



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# **Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo**

**Pedro Miguel Cardoso Carneiro**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Aeronáutica**  
(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Vieira Gamboa

**Covilhã, outubro de 2017**



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Vieira Gamboa, pelo seu apoio e dedicação ao longo deste trabalho e sobretudo por compartilhar o seu conhecimento e experiência comigo.

Gostaria de agradecer ao técnico de laboratório, Senhor Rui Paulo, por toda a sua disponibilidade e ajuda.

Um agradecimento especial aos meus pais, Albino e Maria da Glória, por todo o seu suporte ao longo deste capítulo da minha vida, sem eles nada disto teria sido possível.

Aos demais familiares, um obrigado por toda a força transmitida e palavras sábias.

Gostaria de expressar uma gratidão particular aos meus verdadeiros amigos, aqueles que estiveram sempre a meu lado durante esta jornada, obrigado a todos.

A todos os meus colegas de curso, obrigado por todo o auxílio e companheirismo.

Por fim, mas não menos importante, um agradecimento especial à Beatriz por todas as palavras de apoio e incentivo. Sem ela este caminho teria sido muito mais difícil.





## Resumo

O fabrico aditivo, em inglês *Additive Manufacturing* (AM), surgiu nos últimos anos como uma tecnologia chave na fabricação de componentes estruturais de aeronaves. Este permite explorar topologias estruturais mais complexas e mais eficientes, bem como reduzir o desperdício de material. O presente trabalho tem como objetivo investigar as características de rigidez e resistência de várias nervuras com diferentes topologias estruturais prescritas ou otimizadas, construídas através de AM. Esta dissertação descreve o design, os procedimentos numéricos e experimentais e a otimização de nervuras fabricadas com ácido polilático (PLA) usando a tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*). As topologias estudadas foram projetadas com base em algumas configurações tradicionais onde as cargas de flexão e as cargas de corte devem ser transmitidas ao longo da nervura para a longarina da asa. Estes layouts da nervura incluem treliças bidimensionais, favo de mel e topologias de *lightening-hole*, entre outros. As análises numéricas foram realizadas utilizando o módulo de análise estrutural estática do software Ansys Workbench para dois carregamento distintos. O primeiro carregamento é uma simplificação em que a força distribuída ao longo da corda, resultante da força de sustentação, é substituída por duas cargas concentradas equivalentes junto ao bordo de ataque e ao bordo de fuga. O objetivo aqui é analisar numericamente uma situação cuja validação experimental é viável. O segundo carregamento representa uma situação mais realista onde as cargas distribuídas são aplicadas nas superfícies superior e inferior do perfil aerodinâmico para produzir uma resposta estrutural melhorada durante o voo. Uma função de mérito que contém a tensão máxima equivalente de von-Mises, o deslocamento máximo e a energia de deformação é calculada para avaliar quantitativamente quais as geometrias da nervura que apresentam o melhor desempenho estrutural. Além disso, um problema de otimização estrutural é realizado usando Topology Optimization (TO). Este método matemático, que otimiza o layout do material dentro de um determinado espaço de design para um determinado conjunto de cargas, condições de fronteira e restrições com o objetivo de maximizar o desempenho do sistema, é aplicado para minimizar a massa da nervura da asa sujeita a restrições de resistência e rigidez. Os resultados mostram um bom acordo geral entre os deslocamentos e tensões calculados numericamente e os resultados obtidos a partir de testes experimentais. A otimização topológica é útil para produzir nervuras estruturalmente melhoradas com layouts complexos não triviais que são facilmente obtidos por técnicas de AM. Algumas fontes de erros experimentais e numéricos são identificadas e alguns melhoramentos são propostos.

## Palavras-chave

Fabrico Aditivo, Nervura, Otimização Topológica



## Abstract

Additive manufacturing (AM) has emerged over the last years as a key technology in aircraft structural components' manufacturing. It enables more complex and more efficient structural topologies to be explored as well as to reduce material waste. The present work aims at investigating stiffness and strength characteristics of several wing ribs having different prescribed or optimized structural topologies that were built by AM. This paper describes the design, the numerical and experimental procedures and the optimization of wing ribs manufactured with polylactic acid (PLA) using the Fused Deposition Modeling (FDM) technology. The studied wing rib concepts were designed based on some traditional configurations where bending loads and shear loads must be transmitted along the rib to the wing spar. These wing rib layouts include two-dimensional truss, honeycomb and lightening-hole topologies, among others. Numerical analyses were performed using Ansys Workbench's static structural analysis for two distinct loading cases. The first loading is a simplification in which the chordwise distributed force, resulting from wing lift, is replaced by two equivalent concentrated loads at the leading and trailing edges. The objective here is to numerically analyze a situation whose experimental validation is feasible. The second loading represents a more realistic situation where distributed loads are applied on the upper and on the lower surfaces of the airfoil to produce an improved structural response during flight. A merit function containing maximum equivalent von-Mises stress, maximum displacement and strain energy is computed in order to quantitatively evaluate which wing rib concepts present the best overall structural performance. In addition, a structural optimization problem is performed using Topology Optimization (TO). This mathematical method, which optimizes material layout within a given design space for a given set of loads, boundary conditions and constraints with the goal of maximizing the performance of the system, is applied to minimize the wing rib mass subject to strength and stiffness constraints. The results show a general good agreement between the displacements and stresses numerically calculated and the results obtained from experimental tests. Topology optimization is useful to produce structurally improved wing ribs with complex non-trivial layouts which are easily obtained by AM techniques. Some sources of numerical and experimental errors are identified and some enhancements are proposed.

## Keywords

Additive Manufacturing, Wing Rib, Topology Optimization



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	1
1.3	Estrutura da tese . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Estado da arte</b>	<b>3</b>
2.1	Impressão 3D - Definição . . . . .	3
2.2	Evolução e Filosofia . . . . .	3
2.3	Tecnologias . . . . .	5
2.3.1	Modelação por deposição fundida . . . . .	5
2.3.2	Polyjet . . . . .	6
2.3.3	Estereolitografia . . . . .	7
2.3.4	Sinterização a Laser . . . . .	8
2.4	Materiais . . . . .	9
2.5	Aplicações . . . . .	9
2.6	Potencialidades e desafios da impressão 3D . . . . .	10
2.6.1	Potencialidades da impressão 3D . . . . .	11
2.6.2	Desafios da impressão 3D . . . . .	12
2.7	Configuração estrutural de nervuras . . . . .	14
2.8	Modelos de Otimização Topológica . . . . .	15
2.9	Conclusão . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Caso de estudo</b>	<b>21</b>
3.1	Contextualização . . . . .	21
3.2	Seleção dos materiais e suas propriedades . . . . .	22
3.3	Cálculo do carregamento . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Estudo Numérico</b>	<b>29</b>
4.1	Introdução . . . . .	29
4.2	Caraterização do material e análises efetuadas . . . . .	29
4.3	Estudo de convergência de malha . . . . .	34
4.4	Resultados das simulações . . . . .	37
4.4.1	Primeiro Carregamento . . . . .	46
4.4.2	Segundo Carregamento . . . . .	46
4.5	Análise de resultados . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Otimização Topológica</b>	<b>51</b>
5.1	Introdução . . . . .	51
5.2	Formulação matemática . . . . .	51
5.3	Descrição do processo . . . . .	52
5.4	Análises efetuadas . . . . .	53
5.4.1	Primeiro Carregamento . . . . .	53
5.4.2	Segundo Carregamento . . . . .	54
5.5	Resultados da otimização . . . . .	56

## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

5.5.1	Primeiro Carregamento . . . . .	56
5.5.2	Segundo Carregamento . . . . .	57
5.6	Análise e validação dos resultados . . . . .	57
5.6.1	Primeiro Carregamento . . . . .	58
5.6.2	Segundo Carregamento . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Estudo experimental</b>	<b>63</b>
6.1	Introdução . . . . .	63
6.2	Impressora e suas propriedades . . . . .	63
6.3	Descrição da montagem . . . . .	64
6.4	Resultados dos ensaios experimentais . . . . .	69
<b>7</b>	<b>Discussão de resultados</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>Conclusões e Recomendações</b>	<b>79</b>
8.1	Conclusões . . . . .	79
8.2	Trabalhos futuros . . . . .	80
8.2.1	Numéricos . . . . .	80
8.2.2	Experimentais . . . . .	80
	<b>Bibliografia</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Imagens Ansys escala automática</b>	<b>87</b>

## Lista de Figuras

2.1	Comparação de filosofias entre os métodos de fabricação tradicionais e o fabrico aditivo . . . . .	4
2.2	Descrição do processo de fabrico aditivo . . . . .	5
2.3	Exemplificação do processo de Fused Deposition Modeling . . . . .	6
2.4	Exemplificação do processo de Polyjet . . . . .	7
2.5	Exemplificação do processo de Estereolitografia . . . . .	8
2.6	Exemplificação do processo de Sinterização Seletiva a Laser . . . . .	8
2.7	Carro fabricado pela Local Motors com recurso a tecnologia de FDM . . . . .	10
2.8	Aeronave não tripulado fabricada pela Stratasys com recurso a tecnologia de FDM . . . . .	10
2.9	Exemplificação de concentração de tensões nos cantos . . . . .	13
2.10	Evolução do preço por unidade de acordo com o número de unidades produzidas para fabrico tradicional e fabrico aditivo . . . . .	14
2.11	Exemplos da estrutura de nervuras . . . . .	15
3.1	Imagem do perfil utilizado recorrendo ao software XLFR5. . . . .	22
3.2	Distâncias em metros entre as cargas pontuais e a posição da longarina. . . . .	22
3.3	Diferença de acabamento em termos de brilho entre PLA (esquerda) e ABS (direita) . . . . .	23
3.4	Influência do afilamento na distribuição de sustentação ao longo da envergadura . . . . .	25
3.5	Distribuição aproximada da sustentação ao longo da corda . . . . .	25
3.6	Efeito do ângulo de ataque na distribuição de sustentação entre extradorso e intradorso . . . . .	26
3.7	Distribuição aproximada de sustentação entre extradorso e intradorso . . . . .	26
4.1	Exemplificação do sistema de eixos utilizado durante as análises numéricas. . . . .	30
4.2	Exemplificação da aplicação das cargas pontuais nas topologias analisadas. . . . .	31
4.3	Exemplificação da aplicação da carga distribuída ao longo do intradorso das topologias analisadas. . . . .	31
4.4	Representação das condições de fronteira utilizadas nas análises efetuadas. . . . .	32
4.5	Primeira topologia utilizada para análise. . . . .	32
4.6	Segunda topologia utilizada para análise. . . . .	33
4.7	Terceira topologia utilizada para análise. . . . .	33
4.8	Quarta topologia utilizado para análise. . . . .	33
4.9	Quinta topologia utilizada para análise. . . . .	33
4.10	Sexta topologia utilizada para análise. . . . .	33
4.11	Sétima topologia utilizada para análise. . . . .	33
4.12	Oitava topologia utilizada para análise. . . . .	34
4.13	Nona topologia utilizada para análise. . . . .	34
4.14	Décima topologia utilizada para análise. . . . .	34
4.15	Exemplo da seleção de elementos gerados na malha com determinado índice de qualidade. . . . .	35
4.16	Elementos gerados durante as análises: A - Hexaedro de 20 nós; B - Prisma de 15 nós; C - Tetraedro de 10 nós. . . . .	36
4.17	Malha utilizada na nona topologia na análise referente ao segundo carregamento. . . . .	36

4.18 Representação da qualidade dos elementos gerados na nona topologia utilizada na análise referente ao segundo carregamento. . . . .	37
4.19 Deformação total para a primeira topologia durante o primeiro carregamento. . .	38
4.20 Deformação total para a segunda topologia durante o primeiro carregamento. . .	38
4.21 Deformação total para a terceira topologia durante o primeiro carregamento. . .	38
4.22 Deformação total para a quarta topologia durante o primeiro carregamento. . . .	38
4.23 Deformação total para a quinta topologia durante o primeiro carregamento. . . .	38
4.24 Deformação total para a sexta topologia durante o primeiro carregamento. . . .	39
4.25 Deformação total para a sétima topologia durante o primeiro carregamento. . .	39
4.26 Deformação total para a oitava topologia durante o primeiro carregamento. . . .	39
4.27 Deformação total para a nona topologia durante o primeiro carregamento. . . .	39
4.28 Deformação total para a décima topologia durante o primeiro carregamento. . .	39
4.29 Tensão equivalente de von-Mises para a primeira topologia durante o primeiro carregamento. . . . .	40
4.30 Tensão equivalente de von-Mises para a segunda topologia durante o primeiro carregamento. . . . .	40
4.31 Tensão equivalente de von-Mises para a terceira topologia durante o primeiro carregamento. . . . .	40
4.32 Tensão equivalente de von-Mises para a quarta topologia durante o primeiro carregamento. . . . .	40
4.33 Tensão equivalente de von-Mises para a quinta topologia durante o primeiro carregamento. . . . .	40
4.34 Tensão equivalente de von-Mises para a sexta topologia durante o primeiro carregamento. . . . .	41
4.35 Tensão equivalente de von-Mises para a sétima topologia durante o primeiro carregamento. . . . .	41
4.36 Tensão equivalente de von-Mises para a oitava topologia durante o primeiro carregamento. . . . .	41
4.37 Tensão equivalente de von-Mises para o nono modelo durante o primeiro carregamento. . . . .	41
4.38 Tensão equivalente de von-Mises para a décima topologia durante o primeiro carregamento. . . . .	41
4.39 Deformação total para a primeira topologia durante o segundo carregamento. . .	42
4.40 Deformação total para a segunda topologia durante o segundo carregamento. . .	42
4.41 Deformação total para a terceira topologia durante o segundo carregamento. . .	42
4.42 Deformação total para a quarta topologia durante o segundo carregamento. . . .	42
4.43 Deformação total para a quinta topologia durante o segundo carregamento. . . .	42
4.44 Deformação total para a sexta topologia durante o segundo carregamento. . . .	43
4.45 Deformação total para a sétima topologia durante o segundo carregamento. . . .	43
4.46 Deformação total para a oitava topologia durante o segundo carregamento. . . .	43
4.47 Deformação total para a nona topologia durante o segundo carregamento. . . .	43
4.48 Deformação total para a décima topologia durante o segundo carregamento. . .	43
4.49 Tensão equivalente de von-Mises para a primeira topologia durante o segundo carregamento. . . . .	44
4.50 Tensão equivalente de von-Mises para a segunda topologia durante o segundo carregamento. . . . .	44



4.51 Tensão equivalente de von-Mises para a terceira topologia durante o segundo carregamento. . . . .	44
4.52 Tensão equivalente de von-Mises para a quarta topologia durante o segundo carregamento. . . . .	44
4.53 Tensão equivalente de von-Mises para a quinta topologia durante o segundo carregamento. . . . .	44
4.54 Tensão equivalente de von-Mises para a sexta topologia durante o segundo carregamento. . . . .	45
4.55 Tensão equivalente de von-Mises para a sétima topologia durante o segundo carregamento. . . . .	45
4.56 Tensão equivalente de von-Mises para a oitava topologia durante o segundo carregamento. . . . .	45
4.57 Tensão equivalente de von-Mises para a nona topologia durante o segundo carregamento. . . . .	45
4.58 Tensão equivalente de von-Mises para a décima topologia durante o segundo carregamento. . . . .	45
5.1 Descrição do processo de otimização topológica . . . . .	53
5.2 Topologia de nervura utilizada para o primeiro conjunto de otimizações topológicas. . . . .	54
5.3 <i>Design region</i> e <i>exclusion region</i> utilizadas no primeiro conjunto de otimizações topológicas. . . . .	54
5.4 Metas definidas para a primeira otimização topológica do conjunto inicial. . . . .	54
5.5 Topologia de nervura utilizado para o segundo conjunto de otimizações topológicas. . . . .	55
5.6 <i>Design region</i> e <i>exclusion region</i> utilizadas no segundo conjunto de otimizações topológicas. . . . .	55
5.7 Metas definidas para a primeira otimização topológica do segundo conjunto. . . . .	55
5.8 Resultado da otimização para a primeira análise do primeiro conjunto. . . . .	56
5.9 Resultado da otimização para a segunda análise do primeiro conjunto. . . . .	56
5.10 Resultado da otimização para a primeira análise do segundo conjunto. . . . .	57
5.11 Resultado da otimização para a segunda análise do segundo conjunto. . . . .	57
5.12 Resultado da refinação da primeira proposta de otimização do primeiro conjunto de estudos efetuados. . . . .	58
5.13 Resultado da refinação da segunda proposta de otimização do primeiro conjunto de estudos efetuados. . . . .	58
5.14 Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da primeira otimização do primeiro conjunto de análises. . . . .	59
5.15 Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da primeira otimização do primeiro conjunto de análises. . . . .	59
5.16 Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da segunda otimização do primeiro conjunto de análises. . . . .	59
5.17 Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da segunda otimização do primeiro conjunto de análises. . . . .	59
5.18 Resultado da refinação da primeira proposta de otimização do segundo conjunto de estudos efetuados. . . . .	60
5.19 Resultado da refinação da segunda proposta de otimização do segundo conjunto de estudos efetuados. . . . .	60

5.20 Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da primeira otimização do segundo conjunto de análises. . . . .	61
5.21 Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da primeira otimização do segundo conjunto de análises. . . . .	61
5.22 Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da segunda otimização do segundo conjunto de análises. . . . .	61
5.23 Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da segunda otimização do segundo conjunto de análises. . . . .	61
6.1 Impressora utilizada para fabricação das topologias analisadas. . . . .	64
6.2 Representação isométrica da montagem experimental utilizada durante os ensaios de deformação. . . . .	65
6.3 Ligação entre o suporte de madeira a estrutura da nervura. . . . .	66
6.4 Ligação entre o recipiente para colocação de carga e o suporte de madeira. . . . .	66
6.5 Colocação do comparador para medição da deformação. . . . .	67
6.6 Montagem experimental final utilizada nos ensaios de deformação. . . . .	67
6.7 Primeira exemplificação da flambagem provocada na estrutura quando esta se encontrava solicitada por cargas elevadas. . . . .	68
6.8 Segunda exemplificação da flambagem provocada na estrutura quando esta se encontrava solicitada por cargas elevadas. . . . .	68
6.9 Representação isométrica da montagem experimental utilizada durante os ensaios de rutura. . . . .	68
6.10 Montagem experimental final utilizada nos ensaios de rutura. . . . .	69
6.11 Primeira topologia após a sua fabricação. . . . .	69
6.12 Segunda topologia após a sua fabricação. . . . .	69
6.13 Terceira topologia após a sua fabricação. . . . .	70
6.14 Quarta topologia após a sua fabricação. . . . .	70
6.15 Quinta topologia após a sua fabricação. . . . .	70
6.16 Sexta topologia após a sua fabricação. . . . .	70
6.17 Sétima topologia após a sua fabricação. . . . .	70
6.18 Oitava topologia após a sua fabricação. . . . .	70
6.19 Nona topologia após a sua fabricação. . . . .	71
6.20 Décima topologia após a sua fabricação. . . . .	71
6.21 Primeira topologia resultante do primeiro conjunto de otimizações topológicas após a sua fabricação. . . . .	71
6.22 Segunda topologia resultante do primeiro conjunto de otimizações topológicas após a sua fabricação. . . . .	71
7.1 Estado das nervuras após os ensaios de rutura. . . . .	75
A.1 Deformação total para a primeira topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	87
A.2 Deformação total para a segunda topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	87
A.3 Deformação total para a terceira topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	87
A.4 Deformação total para a quarta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	87

A.5	Deformação total para a quinta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	88
A.6	Deformação total para a sexta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	88
A.7	Deformação total para a sétima topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	88
A.8	Deformação total para a oitava topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	88
A.9	Deformação total para a nona topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	88
A.10	Deformação total para a décima topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	89
A.11	Tensão equivalente de von-Mises para a primeira topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	89
A.12	Tensão equivalente de von-Mises para a segunda topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	89
A.13	Tensão equivalente de von-Mises para a terceira topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	89
A.14	Tensão equivalente de von-Mises para a quarta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	89
A.15	Tensão equivalente de von-Mises para a quinta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	90
A.16	Tensão equivalente de von-Mises para a sexta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	90
A.17	Tensão equivalente de von-Mises para a sétima topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	90
A.18	Tensão equivalente de von-Mises para a oitava topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	90
A.19	Tensão equivalente de von-Mises para o nono modelo durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	90
A.20	Tensão equivalente de von-Mises para a décima topologia durante o primeiro carregamento (escala automática). . . . .	91
A.21	Deformação total para a primeira topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	91
A.22	Deformação total para a segunda topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	91
A.23	Deformação total para a terceira topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	91
A.24	Deformação total para a quarta topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	91
A.25	Deformação total para a quinta topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	92
A.26	Deformação total para a sexta topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	92
A.27	Deformação total para a sétima topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	92

A.28 Deformação total para a oitava topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	92
A.29 Deformação total para a nona topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	92
A.30 Deformação total para a décima topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	93
A.31 Tensão equivalente de von-Mises para a primeira topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	93
A.32 Tensão equivalente de von-Mises para a segunda topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	93
A.33 Tensão equivalente de von-Mises para a terceira topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	93
A.34 Tensão equivalente de von-Mises para a quarta topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	93
A.35 Tensão equivalente de von-Mises para a quinta topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	94
A.36 Tensão equivalente de von-Mises para a sexta topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	94
A.37 Tensão equivalente de von-Mises para a sétima topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	94
A.38 Tensão equivalente de von-Mises para a oitava topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	94
A.39 Tensão equivalente de von-Mises para a nona topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	94
A.40 Tensão equivalente de von-Mises para a décima topologia durante o segundo carregamento (escala automática). . . . .	95
A.41 Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da primeira otimização do primeiro conjunto de análises (escala automática). . . . .	95
A.42 Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da primeira otimização do primeiro conjunto de análises (escala automática). . .	95
A.43 Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da segunda otimização do primeiro conjunto de análises (escala automática). . . . .	95
A.44 Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da segunda otimização do primeiro conjunto de análises (escala automática). . .	95
A.45 Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da primeira otimização do segundo conjunto de análises (escala automática). . . . .	96
A.46 Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da primeira otimização do segundo conjunto de análises (escala automática). . .	96
A.47 Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da segunda otimização do segundo conjunto de análises (escala automática). . . . .	96
A.48 Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da segunda otimização do segundo conjunto de análises (escala automática). . .	96

## Lista de Tabelas

2.1	Propriedades das várias metodologias de otimização topológica . . . . .	16
2.2	Estratégias usadas nos modelos ISE e IS . . . . .	17
2.3	Vantagens relativas das estratégias SIMP, OMP e NOM . . . . .	17
2.4	Desvantagens relativas das estratégias SIMP, OMP e NOM . . . . .	17
2.5	Resumo das diferentes tecnologias utilizadas na impressão 3D e aplicações já existentes na indústria aeronáutica . . . . .	19
3.1	Dados do UAV utilizados para o cálculo do carregamento. . . . .	21
3.2	Propriedades dos materiais analisados. . . . .	24
3.3	Primeiro carregamento analisado. . . . .	28
3.4	Segundo carregamento analisado. . . . .	28
4.1	Relações entre as propriedades existentes na direção de impressão e as restantes direções para o ABS. . . . .	30
4.2	Correspondência entre propriedades da referência e propriedades das topologias analisadas. . . . .	30
4.3	Propriedades utilizadas para caracterização mecânica do PLA. . . . .	31
4.4	Valores da constante C consoante o tipo de elemento. . . . .	35
4.5	Resultados da análise das malhas utilizados nas diversas topologias durante a análise correspondente ao primeiro carregamento. . . . .	37
4.6	Resultados da análise das malhas utilizados nas diversas topologias durante a análise correspondente ao segundo carregamento. . . . .	37
4.7	Valores dos parâmetros de avaliação resultantes do primeiro conjunto de simulações efetuadas. . . . .	47
4.8	Valores dos parâmetros de avaliação resultantes do segundo conjunto de simulações efetuadas. . . . .	47
4.9	Resultados da aplicação da equação $DE$ às topologias analisados. . . . .	48
4.10	Resultados da aplicação da equação $DF$ às topologias analisadas. . . . .	49
5.1	Resultados da análise da geometria proveniente da primeira otimização do primeiro conjunto. . . . .	59
5.2	Resultados da análise da geometria proveniente da segunda otimização do primeiro conjunto. . . . .	60
5.3	Resultados da análise da geometria proveniente da primeira otimização do segundo conjunto. . . . .	61
5.4	Resultados da análise da geometria proveniente da segunda otimização do segundo conjunto. . . . .	62
5.5	Avaliação quantitativa das soluções geradas pelo processo de otimização topológica. . . . .	62
6.1	Valores dos parâmetros de impressão utilizados. . . . .	63
6.2	Resultados obtidos pela medição da massa, da deformação e da carga de rutura das várias topologias. . . . .	72
7.1	Comparação entre a massa sugerida pelas simulações numéricas e a massa medida experimentalmente. . . . .	73

## **Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo**

7.2	Comparação entre as deformações obtidas pelo modelo numérico e aquelas medidas experimentalmente. . . . .	74
7.3	Comparação entre os resultados numéricos e experimentais relacionados com a resistência das topologias analisadas. . . . .	75

## Lista de Acrónimos

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AM	Additive Manufacturing
ASE	Anisotropic Solid Empty
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
DDP	Dual Discrete Programming
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite Element Method
FFF	Fused Filament Fabrication
IS	Isotropic Solid
ISE	Isotropic Solid Empty
ISEC	Isotropic Solid Empty Composite
ISECP	Isotropic Solid Empty Composite Porous
ISEP	Isotropic Solid Empty Porous
NOM	Non Optimal Microstructures
OMP	Optimal Microstructures with Penalization
PCL	Polycaprolactone
PLA	Polylactic Acid
PZT	Piezoelectric
SIMP	Solid Isotropic Microstructures with Penalization
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
SMP	Shape-Memory Polymer
UAV	Unmanned Aerial Vehicle





## Lista de Símbolos

$a$	Rácio de redução de volume
$b$	Envergadura
$C$	Constante
$c$	Corda
$DE$	Desempenho Estrutural
$DF$	Desempenho final
$d$	Deformação
$d_c$	Incremento de corda
$d_j$	Distância a jusante
$d_m$	Distância a montante
$d_{pj}$	Distância pontual a jusante
$d_{pm}$	Distância pontual a montante
$d_n$	Distância entre nervuras consecutivas
$d_{ref}$	Deformação de referência
$E$	Módulo de Young na direção principal
$E_i$	Tensor de elasticidade de cada elemento
$E_{\eta_i}$	Tensor de elasticidade afetado pela pseudo-densidade
$E_x$	Módulo de Young na direção x
$E_y$	Módulo de Young na direção y
$E_z$	Módulo de Young na direção z
$E'$	Módulo de Young nas direções transversais
$e$	Energia de deformação
$\varepsilon_i$	Vetor de deformações
$e_{ref}$	Energia de deformação de referência
$F_{pj}$	Força pontual a jusante
$F_{pm}$	Força pontual a montante
$G$	Módulo de corte na direção principal
$G_{xy}$	Módulo de corte no plano xy
$G_{xz}$	Módulo de corte no plano xz
$G_{yz}$	Módulo de corte no plano yz
$G'$	Módulo de corte nas direções transversais
$Hex_{20}$	Hexaedro de 20 nós
$L$	Sustentação
$M_{jusante}$	Momento a jusante
$M_{montante}$	Momento a montante
$\eta_i$	Pseudo-densidade
$\sigma_i$	Vetor de tensões
$P$	Pressão
$pc$	Posição ao longo da corda
$P_j$	Distribuição de força a jusante
$P_m$	Distribuição de força a montante
$P_{nervura}$	Pressão na nervura
$t$	Tensão
$Tet_{10}$	Tetraedro de 10 nós
$t_{ref}$	Tensão de referência

## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

$U_{ci}$	Conformidade nas condições de carregamento
$u_c$	Conformidade
$V$	Volume total
$V_2$	Volume antes da otimização
$V_i$	Volume de cada elemento
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\nu_{xy}$	Coeficiente de Poisson no plano xy
$\nu_{xz}$	Coeficiente de Poisson no plano xz
$\nu_{yz}$	Coeficiente de Poisson no plano yz
$\nu'$	Coeficiente de Poisson nas direções transversais
$W_i$	Componente das condições de carregamento
$Wed_{15}$	Prisma de 15 nós

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A tecnologia de impressão 3D tem conquistado cada vez mais espaço em diversos ramos da indústria. Seja desenvolvendo protótipos, peças finais, ou ferramentas especializadas e individualizadas, as impressoras 3D diminuem tempos e custos de produção. A evolução do fabrico aditivo tem protagonizado o que ficou conhecido como Nova Revolução Industrial ou Indústria 4.0. A possibilidade de imprimir peças muito complexas de uma só vez, com a quantidade exata de matéria-prima necessária para a sua execução é uma das grandes vantagens da impressão 3D. No fabrico tradicional, muitas vezes é preciso investir em diversos mecanismos para operar materiais diferentes, o que implica custos elevados e aumento do tempo de produção. Com impressoras 3D que utilizam tecnologias Fused Deposition Modeling (FDM), por exemplo, é possível num único processo trabalhar com matérias-primas variadas, tornando a fabricação muito mais prática. A tendência para um futuro próximo é ampliar a panóplia de materiais cuja impressão em 3D seja viável. A indústria aponta que 20% da sua produção deverá envolver processos de impressão 3D até 2025. Seguindo este caminho estão a Ford Motors, a Airbus e a Boeing, que já incorporaram a tecnologia às suas inovações e vêm investindo crescentemente nessa tecnologia. Os materiais utilizados para impressão 3D, em geral, apresentam-se sob a forma de pós ou filamentos, o que os torna muito mais fáceis de armazenar e transportar comparativamente a peças compactas normalmente usadas no fabrico tradicional. Isso significa que as fábricas podem sair dos grandes pólos industriais e aproximar-se geograficamente dos centros consumidores, ou mesmo dos locais onde sejam necessárias, por exemplo, aeroportos, navios, e outros lugares estratégicos para produção de peças de manutenção. Essa é a expectativa da Local Motors, que desde 2014 tem investido na expansão de “micro fábricas”, uma vez que as impressoras podem ser instaladas em qualquer lugar. Essa vantagem possui um impacto positivo nos custos de transporte e mão-de-obra, otimizando toda a logística da empresa. Estas são apenas algumas das vantagens da impressão 3D para a indústria. A previsão mais otimista aponta para que esta tecnologia revolucione definitivamente a lógica industrial, substituindo as grandes fábricas e suas infinitas cadeias produtivas, por processos mais práticos, mais baratos e mais eficientes. Tudo isto conjugado torna o fabrico aditivo num ramo de investigação aliciante e com elevada potencialidade. Motivado pelo crescente interesse da indústria pelo fabrico por adição e convicto nas vantagens supraditas a escolha por esta área de investigação foi movida pela necessidade de construir referências e retirar ilações da aplicação deste tipo de fabricação na indústria aeronáutica, nomeadamente na estrutura de uma asa.

### 1.2 Objetivos

Os objetivos inerentes a este trabalho estão divididos em dois grandes grupos. Primeiramente, conceber e testar, quer numericamente quer experimentalmente, diversas topologias para a estrutura de uma nervura obtidas com recurso ao fabrico aditivo. Posteriormente, recorrer a

modelos de otimização estrutural para a obtenção de topologias mais eficientes; analisar essas mesmas topologias e comparar as soluções obtidas com os resultados provenientes das topologias inicialmente propostas. Com o intuito de mais facilmente atingir os objetivos propostos é de extrema importância dividir a metodologia por várias etapas, que são:

- Investigação e seleção do processo de fabrico aditivo mais adequado para a conceção das estruturas.
- Averiguação dos materiais disponíveis para o fabrico e suas propriedades com vista à escolha do mais indicado para a construção das topologias pretendidas.
- Desenvolvimento e desenho de diversas topologias para a estrutura da nervura.
- Implementação do modelo numérico para a simulação das topologias, nomeadamente, cálculo e aplicação do carregamento, aplicação das condições de fronteira e estudo da convergência de malha.
- Escolha do modelo de otimização estrutural e análise dos resultados provenientes do mesmo.
- Conceção e construção da montagem experimental com vista à recolha de dados para posterior validação do modelo numérico.
- Comparação entre os resultados numéricos e experimentais.

### **1.3 Estrutura da tese**

Esta dissertação está dividida em 8 capítulos principais. O capítulo 2 engloba uma pequena descrição do estado da arte onde é abordado o ramo do fabrico aditivo, analisando a sua evolução histórica. São também apresentadas algumas das várias tecnologias utilizadas, os diferentes tipos de materiais existentes e aplicações desta tecnologia em vários sectores, com ênfase na indústria aeronáutica. Neste capítulo é ainda abordada a temática das vantagens do fabrico aditivo e quais os seus principais desafios e potencialidades para aplicação no sector aeronáutico. No capítulo 3 é apresentado o caso de estudo, neste encontra-se detalhado o processo de decisão com vista à seleção do material utilizado na impressão assim como o cálculo do carregamento proveniente da aplicação da estrutura da nervura a um contexto real. O capítulo 4 é dedicado às simulações numéricas e inclui uma descrição das topologias analisadas, o estudo de convergência de malha e por fim a apresentação dos resultados provenientes das simulações. O capítulo 5 foca-se no processo de otimização estrutural. Neste é explicado sucintamente o funcionamento da metodologia de otimização sendo também apresentados os resultados provenientes da análise das geometrias obtidas neste processo. O capítulo 6 é dedicado ao procedimento experimental, incluindo uma introdução à impressora e às propriedades de impressão utilizadas, uma breve descrição da montagem experimental e por fim apresentação dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. No capítulo 7, os resultados numéricos e experimentais são confrontados, avaliando efetivamente a precisão dos resultados numéricos em relação aos resultados experimentais. Finalmente, no Capítulo 8, são extraídas as principais conclusões dos resultados apresentados e discute-se a satisfação dos objetivos inicialmente propostos. Adicionalmente sugerem-se possíveis desenvolvimentos e trabalhos futuros dentro desta temática.

## Capítulo 2

### Estado da arte

#### 2.1 Impressão 3D - Definição

A impressão 3D, também designada por processo de fabrico aditivo, pode ser descrita como um conjunto de técnicas de fabricação em que componentes são fabricados camada por camada diretamente de um ficheiro CAD (Computer Aided Design) [1]. Mais do que qualquer outra tecnologia, o fabrico aditivo veio aproximar as realidades físicas e virtuais, uma vez que com este tipo de fabricação é possível conceber estruturas leves com características internas complexas que são difíceis de produzir usando métodos de fabricação convencionais. A capacidade de imprimir estruturas internas complexas sem a necessidade de um molde dá ao fabrico por adição uma mais-valia em relação ao fabrico convencional [2]. As principais vantagens desta tecnologia são: reduzir os custos de produção, aumentar a velocidade de fabricação e controlar os parâmetros do processo que influenciam diretamente as propriedades da peça construída. A técnica de AM é uma das técnicas mais promissoras para a produção de peças, permitindo que o usuário final tenha diretamente um protótipo ou componente que possa ser usado poucas horas depois da fase de design [2]. No entanto a impressão 3D ainda está restringida a poucos materiais, cores e acabamentos possíveis, sendo que esses mesmos materiais apresentam também uma resistência limitada ao calor e à humidade [3]

#### 2.2 Evolução e Filosofia

O princípio da impressão 3D, inicialmente denominada “prototipagem rápida”, pode ser datada em 1983 época em que Charles Hull inventou a máquina de estereolitografia, patenteada posteriormente em 1986 como um aparelho capaz de produzir objectos tridimensionais por estereolitografia [4]. Em Outubro de 1986, Carl Deckard registou uma patente do método e aparelho para produzir peças por Sinterização Seletiva a Laser, em inglês *Selective Laser Sintering (SLS)* [5]. Em 1989 Scott Crump, co-fundador da empresa Stratasys, registou uma patente de um aparelho e do decorrente método para criar objetos tridimensionais por deposição de material fundido FDM, patente que foi emitida à sua empresa [6]. Um dos maiores avanços na evolução da impressão 3D registou-se em 2005 com a fundação do projecto de código aberto (open source) RepRap. Este projeto foi fundado pelo Dr. Adrian Bowyer, tendo como principal objectivo criar uma máquina que fosse capaz de imprimir os seus próprios componentes. Esta iniciativa permitiu a expansão da impressão 3D do uso industrial para o uso pessoal [7]. O projeto surgiu também com a filosofia de tornar a impressão 3D acessível ao público em geral permitindo aos utilizadores criar os seus próprios modelos sem a intervenção de entidades industriais ou profissionais [8]. O fabrico aditivo trouxe inúmeras possibilidades e vantagens para os utilizadores face aos tradicionais métodos de produção. A Figura 2.1, representa a diferença de filosofias entre os métodos convencionais e o fabrico por adição. Neste diagrama estão representadas quais as principais diferenças entre as duas técnicas de fabricação nomeadamente, tempo de processamento desde a conceção até à obtenção da peça final e influência da complexidade geo-

métrica. De um modo genérico, o fabrico aditivo representa um processo de fabrico mais rápido que permite a construção de peças com geometrias complexas sem necessidade de ferramentas de desgaste, evitando assim desperdício de material.



Figura 2.1: Comparação de filosofias entre os métodos de fabricação tradicionais e o fabrico aditivo, adaptado de [1].

Na Figura 2.2 está descrita de uma forma generalizada o processo de conceção de uma peça impressa em 3D, desde a fase de projeto até à obtenção do produto final. O primeiro passo do processo consiste no desenho digital da peça em formato CAD, podendo estes ser desenhados de raiz, a partir de um ficheiro existente ou mesmo criados com o auxílio de um digitalizador 3D [9]. De seguida, um software especializado “corta” o modelo em camadas transversais, criando um ficheiro com o formato gcode que é enviado para a impressora. Esta cria então o objeto através da deposição do material por camadas.



Figura 2.2: Descrição do processo de fabrico aditivo, adaptado de [10].

## 2.3 Tecnologias

Existe uma grande variedade de tecnologias de impressão 3D, com diferentes potencialidades e aplicações. De seguida, serão descritas algumas das tecnologias de impressão mais utilizadas na indústria aeronáutica, assim como as suas principais vantagens e desvantagens.

### 2.3.1 Modelação por deposição fundida

Este método, em inglês *Fused Deposition Modeling*, tem como princípio de funcionamento derreter um filamento de plástico ou metal em cima de uma plataforma, sendo então designado como um processo de extrusão. Uma ampla gama de termoplásticos pode ser processada através deste método, tal como PLA (Polylactic Acid) [11], nylon [12], ULTEM [13], ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) [14]. Todos estes materiais citados anteriormente pertencem à família dos termoplásticos. No entanto, existem também algumas ligas metálicas utilizadas nesta tecnologia de fabrico [15]. O filamento, inicialmente em estado sólido, passa pelo bico de extrusão da impressora, que se move no plano horizontal e se encontra aquecido de maneira a derreter o material usado (ver Figura 2.3). Este é depois disposto em camadas em cima da plataforma de acordo com a geometria da peça pretendida. Quando a impressão de uma camada no plano estiver concluída a plataforma move-se na vertical e a nova camada está pronta a ser depositada sobre a antiga. A cabeça de extrusão consegue ainda controlar o fluxo do filamento, existindo ainda em certas impressoras uma cabeça de extrusão secundária que serve para imprimir as estruturas de suporte, caso necessárias. O conceito FDM encontra-se patenteado pela Stratasys. No entanto, tendo em conta a proliferação de novos modelos de impressoras no mercado e visto que esta é a tecnologia mais utilizada para impressão 3D, foi criado um processo semelhante ao FDM, denominado Fused Filament Fabrication (FFF). Este processo é então usado sob o nome de FFF por uma grande parte das impressoras existentes, evitando assim quaisquer problemas legais com a Stratasys. A tecnologia de FDM representa a alternativa mais barata para impressão 3D quer nos materiais utilizados quer na impressora em si, sendo também de realçar a elevada velocidade de impressão, particularmente para objetos pequenos [16]. Contudo, as peças impressas costumam ter resoluções mais baixas quando comparadas com objetos semelhantes resultantes de outras tecnologias de fabrico. Esta técnica tem ainda como desvantagem a necessidade de estruturas de suporte, no entanto estas podem ser impressas com material solúvel em água o que torna a sua remoção fácil. Por último, uma grande contrariedade nesta tecnologia é a dificuldade de aderência entre camadas.



Figura 2.3: Exemplificação do processo de Fused Deposition Modeling [17].

### 2.3.2 Polyjet

A impressão PolyJet é semelhante à impressão a jacto de tinta, mas em vez de injectar gotas de tinta sobre o papel, as impressoras 3D PolyJet inserem camadas de um foto polímero líquido curável sobre a plataforma de construção [18]. Esta técnica utiliza resina solúvel para as estruturas de suporte, tornando mais fácil a sua remoção posterior, quer manualmente que por imersão. Uma das vantagens do Polyjet é a capacidade de misturar e imprimir diferentes materiais num único modelo, proporcionando aos utilizadores flexibilidade para a obtenção de designs otimizados (ver Figura 2.4). Em geral, a tecnologia Polyjet fornece um melhor acabamento superficial e precisão estrutural em comparação com a FDM tornando-a ideal para fabricar peças funcionais [19]. As impressoras 3D com tecnologia PolyJet trabalham com uma vasta gama de materiais, incluindo materiais opacos rígidos e borrachas, em centenas de cores, tons translúcidos transparentes e coloridos. Embora esta técnica seja capaz de produzir peças com propriedades semelhantes aos termoplásticos, tem uma desvantagem considerável que é o facto de a taxa de recuperação na condição de cargas elevadas ser muito lenta. Estudos realizados demonstraram que passada uma hora da supressão da carga apenas 80% da forma da estrutura inicial foi recuperada [20].



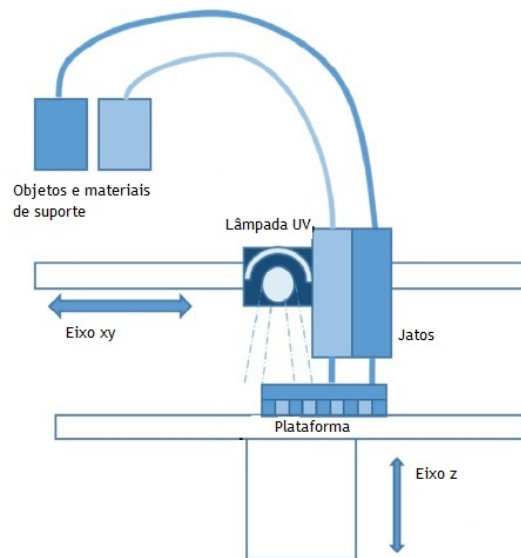


Figura 2.4: Exemplificação do processo de Polyjet, adaptado de [1].

### 2.3.3 Estereolitografia

Estereolitografia (SLA), em inglês *Stereolithography* (SLA), foi o primeiro processo de fabrico aditivo comercialmente disponível desenvolvido pela 3D Systems em 1986 [21]. O seu funcionamento tem como base a solidificação de uma resina/foto polímero com recurso a um laser ultravioleta, ou seja, é baseada num processo de foto polimerização. O foto polímero encontra-se dentro de uma tina que também possui uma plataforma móvel no seu interior, sendo que em cada camada o laser é apontado ao foto polímero de acordo com o objeto a imprimir. Depois do foto polímero solidificar a plataforma move-se na vertical com uma distância correspondente à espessura da camada especificada, sendo de seguida coberta por mais foto polímero para a formação de uma nova camada (ver Figura 2.5). No fim do processo de impressão, o objeto é imerso num banho químico de modo a eliminar os excessos de resina, sendo depois novamente curado de forma a endurecer o foto polímero, desta vez com recurso a um forno ultravioleta. As principais vantagens desta técnica são a precisão, rapidez e acabamento da superfície. Contudo possui algumas desvantagens, nomeadamente, o preço bastante elevado tanto da máquina como do foto polímero em si e a instabilidade do material. Neste campo estudos realizados estimaram que a resistência diminui em 25% a 30°C e em 50% a 40°C [22].

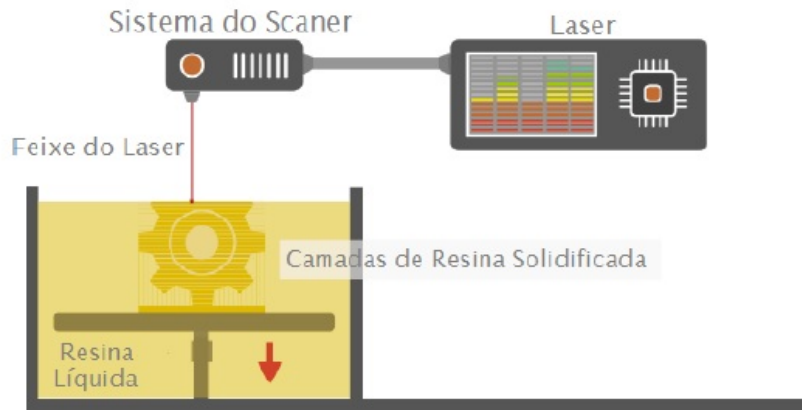


Figura 2.5: Exemplificação do processo de Estereolitografia [17].

### 2.3.4 Sinterização a Laser

O processo Seletivo de Sinterização a Laser, em inglês *Selective Laser Sintering* (SLS), consiste na utilização de um laser de alta potência para fundir pequenas partículas (pó) para construir peças 3D complexas feitas de termoplásticos, metal ou cerâmica [23]. O laser é apontado para uma base de material em pó firmemente compactado e traça uma forma de acordo com o objeto pretendido, tal como o laser na estereolitografia, sendo que aqui o laser interage com o material fundindo-o. Estando uma camada construída a plataforma que suporta toda a impressão desce, para que de seguida um rolo forneça uma nova camada de pó (ver Figura 2.6). Este método possui algumas vantagens nomeadamente, dispensar a construção de estruturas de suporte, já que o pó comprimido que não é fundido consegue cumprir esse objetivo, e ainda ser viável para reciclagem até cinco vezes sem comprometer a qualidade de impressão [24]. No entanto, este método possui diversas desvantagens associadas, uma delas está interligada com o facto de este necessitar de temperaturas elevadas o que torna o processo de arrefecimento mais lento, resultando assim num tempo total de impressão mais longo. Outra desvantagem das peças produzidas por SLS é o acabamento superficial. Estudos efetuados demonstraram que a rugosidade superficial dos objetos impressos usando a tecnologia SLS é cerca de 6.9 micron [25], o que é 5 vezes superior comparada com a do processo de SLA [26].

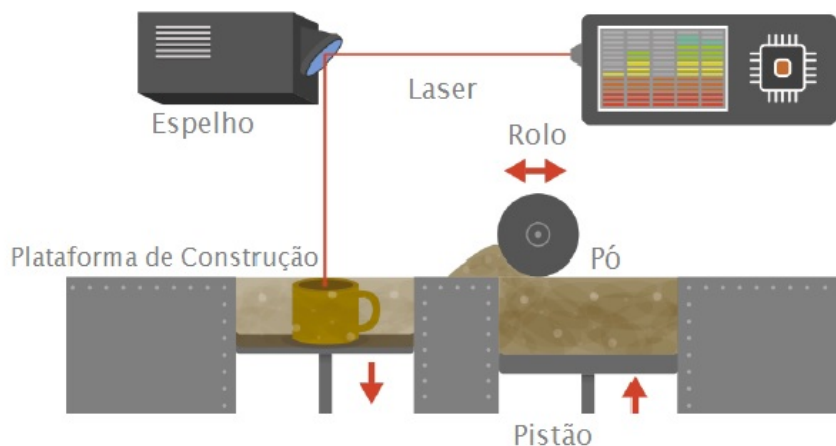


Figura 2.6: Exemplificação do processo de Sinterização Seletiva a Laser [17].

## 2.4 Materiais

Como dito anteriormente, os materiais utilizados para a impressão 3D podem ser apresentados em diversas formas (resina, filamento, pó, etc..) e dentro destas formas existem diversos materiais disponíveis tais como plásticos, metais, bio materiais, entre outros. Dentro dos plásticos os mais comuns são o ABS, o PLA, o Nylon e o ULTEM. O ABS é muito utilizado na forma de filamento em impressoras de extrusão sendo um material resistente, flexível e com capacidade de suportar altas temperaturas. No entanto, quando impresso liberta vapores possivelmente irritantes para pessoas mais sensíveis. O requisito adicional de uma plataforma aquecida significa que algumas impressoras são incapazes de imprimir ABS com confiabilidade [27]. O PLA representa um plástico biodegradável que pode ser usado tanto em filamento como em resina. Quando devidamente arrefecido, o PLA possibilita uma velocidade de impressão superior, alturas de camada mais baixas e cantos impressos mais nítidos, características estas que fazem dele o material mais popular para impressões caseiras [27]. Em termos mecânicos, estudos demonstram que este possui uma tensão de cedência superior ao do ABS assim como, um módulo de elasticidade maior [28]. O ULTEM é um termoplástico ideal para aplicações aeroespaciais e militares por causa da alta relação resistência-peso e certificações existentes. Este material apresenta alta resistência à temperatura ambiente assim como excelentes propriedades de isolamento elétrico mantendo parte significativa destas características a temperaturas elevadas, sendo considerado um dos plásticos de maior desempenho no mercado [29]. No entanto, tem como grande desvantagem ter um custo muito superior aos plásticos de engenharia convencionais. Dentro desta gama temos ainda o Nylon um plástico forte, flexível e duradouro normalmente usado em pó ou filamento. A qualquer um destes materiais podem ser juntados pigmentos, oferecendo uma grande variedade de cores ao consumidor final. No que diz respeito aos metais, o aço inoxidável é aquele mais utilizado nomeadamente em processos de sinterização. O titânio é outro dos materiais mais resistentes que tem vindo a ser utilizado para aplicações industriais sob a forma de pó [30]. Os biomateriais constituem um grupo de materiais sobre os quais incide uma larga escala de desenvolvimento e investigação desde o ramo da medicina até à indústria alimentar [31].

## 2.5 Aplicações

A impressão 3D possui uma vasta gama de aplicações tais como, ramo médico, aeroespacial, automóvel, joalharia, arte, arquitetura, moda etc.. Para o sector médico o fabrico aditivo veio abrir um conjunto de oportunidades com elevado potencial nomeadamente, a impressão de membros protéticos desenhados de acordo com as necessidades específicas dos pacientes. Um dos maiores avanços feitos nesta área registou-se em 2012, quando um maxilar completo foi impresso e implementado numa paciente. No sector automóvel, a empresa Local Motors já imprimiu um carro composto por uma mistura de ABS e fibra de carbono (ver Figura 2.7).

No ramo da arquitetura é conhecido que antes da implementação de qualquer projeto é apresentado um modelo 3D ilustrativo. Tendo isto em consideração, é óbvio que a inclusão da impressão 3D neste processo representa uma mais-valia, uma vez que se podem obter modelos detalhados mais facilmente, em menos tempo e com menos dinheiro. Passando agora para as aplicações no ramo aeronáutico/aeroespacial, onde se insere o estudo desta dissertação, existiu desde cedo um grande interesse na impressão 3D como auxílio no desenvolvimento de produtos e na construção de protótipos. No entanto, o objetivo futuro do fabrico aditivo neste ramo passa



Figura 2.7: Carro fabricado pela Local Motors com recurso a tecnologia de FDM[17].

pela criação de peças a partir da impressora com aplicação direta no produto final. Por enquanto a evolução dos processos e materiais representam o principal foco de desenvolvimento nesta fase. Contudo, existem já componentes impressas diretamente aplicadas em aeronaves em funcionamento assim como criação completa de aviões não tripulados (ver Figura 2.8).



Figura 2.8: Aeronave não tripulada fabricada pela Stratasys com recurso a tecnologia de FDM[17].

## 2.6 Potencialidades e desafios da impressão 3D

Nesta secção do trabalho são apresentadas quais as potencialidades acreditadas à impressão 3D com vista à sua aplicação em veículos aéreos não tripulados (UAVs). São ainda descritos um conjunto de parâmetros chave que representam um desafio para o desenvolvimento do fabrico aditivo, sendo a grande maioria destes desafios encarados atualmente como limitações.

### 2.6.1 Potencialidades da impressão 3D

No que diz respeito às potencialidades do fabrico aditivo para o desenvolvimento da fabricação de UAV's estas exercem uma influência nas mais variadas áreas desde aspetos financeiros até aspetos ligados ao desempenho estrutural.

- Impressão simultânea de vários materiais

Os sistemas com vários materiais oferecem várias vantagens para aplicação em UAVs tais como, alta resistência mecânica, resistência à corrosão, baixo peso. Embora a utilização de multi-materiais confira uma flexibilidade e unicidade à estrutura final, o seu processamento aumenta significativamente a complexidade. O processo de fabrico FDM apresenta-se como um candidato viável para a fabricação multimaterial, porque possui extrusores separados para a conceção do material final e para a construção da estrutura de suporte. Existem já tentativas de modificar o sistema FDM existente, inserindo uma plataforma que transporte os componentes entre duas impressoras para demonstrar a fabricação de material de espessura de camada variável [32]. Trabalhos paralelos efetuados nesta área conduziram pesquisas avançadas no processo de SLS para incorporar processamento de diferentes materiais [33]. A Estereolitografia é especialmente atraente para o processamento multimaterial, pois oferece alta qualidade de acabamento de superfície e precisão dimensional [34]. No entanto, a tecnologia de impressão multimaterial está ainda muito no seu início. São necessários vários estudos e investigações para averiguar a separação entre os materiais e assegurar a compatibilidade dos mesmos.

- Materiais inteligentes para morphing

UAV's com capacidade de morphing têm a vantagem de mudar a sua forma para se adaptar a diferentes condições de voo, garantindo que o seu desempenho é otimizado para cada fase de voo. Materiais inteligentes de fabrico aditivo tais como, materiais piezoelétricos (PZT) e polímeros com memória de forma (SMP's) têm sido alvo de grande atenção recentemente. Efeito piezoelétrico é a capacidade de certos materiais para gerar uma carga elétrica em resposta às tensões mecânicas aplicadas. Os materiais piezoelétricos são especialmente promissores para uma variedade de dispositivos porque podem transformar deformações em muitas escalas de comprimento, induzidas por força e pressão pequenas, vibração mecânica, alongamento/compressão, flexão ou torção, num potencial elétrico capaz de alimentar sistemas circundantes [35]. Estudos abrangentes para projeto, análise e fabricação de compósitos adaptativos através de atuadores piezoelétricos têm sido desenvolvidos e testados ao longo do tempo [36]. Outros estudos desenvolvidos neste sector investigaram um SMP chamado policaprolactona (PCL) para imprimir estruturas complexas, usando a técnica SLA [37].

- Estruturas multifuncionais

Estrutura multifuncional por definição é capaz de executar múltiplas funções numa única plataforma. Com o avanço das técnicas de fabrico aditivo, estruturas multifuncionais podem surgir quer pela utilização de tecnologias de fabricação híbridas combinando processo aditivo com processo de remoção [38], ou pela integração de dois processos de fabrico por adição [39].

- Impressão no local ou sob solicitação

Existe a prática comum de haver componentes armazenados à distância para se proceder a processos de manutenção de UAV's ou então para serem utilizadas em casos de emergência. No

entanto, o custo de manter as peças em inventário pode ser elevado [40]. O fabrico aditivo tem potencialidade para simplificar este problema da cadeia de abastecimento através da impressão a pedido e no local. De acordo com estudos feitos, a impressão no local e sob solicitação reduz o prazo de entrega, armazenamento de stock e custo de transporte [41].

- Novos conceitos de UAVs

Existem algumas aplicações onde os UAV's utilizados para desempenhar determinada missão não são recuperados após a conclusão da mesma, quer devido a escassez de energia quer por destruição [42], sendo então desejável construir UAV's de baixo custo para essas aplicações. Neste sentido, o fabrico aditivo constitui uma alternativa fácil e barata de fabricar UAV's descartáveis. A diminuição de custos relativamente ao fabrico convencional resulta da capacidade do fabrico aditivo reduzir as etapas de fabricação e produzir peças sem a necessidade de ferramentas caras.

### 2.6.2 Desafios da impressão 3D

A utilização de UAV's em diversas aplicações e em múltiplos ambientes de operação constitui um desafio para o qual o fabrico aditivo procura dar resposta, apresentando soluções que possam atender aos requisitos do usuário final. No entanto, o seu desenvolvimento encontra-se ainda numa fase muito inicial existindo uma série de entraves que limitam a sua aplicação ao nível comercial. Algumas dessas limitações são apresentadas de seguida.

- Escolha limitada de materiais de alto desempenho

A escolha dos materiais desempenha um papel importante na determinação do peso e desempenho final do UAV. Vários estudos têm sido desenvolvidos no sentido de incorporar materiais mais resistentes no seio dos plásticos. Estudos efetuados demonstraram que a adição de fibra de carbono em materiais plásticos pode aumentar a resistência à tração e o módulo de Young. No entanto, pode diminuir a tenacidade e a ductilidade [43]. Adicionalmente, o CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) só pode ser impresso em direções retas e horizontais, sendo difícil manipular livremente a orientação da fibra. A pesquisa pode ser direcionada no sentido da exploração de técnicas que permitam manobrar livremente as fibras, melhorando assim as propriedades mecânicas.

- Propriedades anisotrópicos dos materiais

Uma das grandes desvantagens do fabrico aditivo está relacionada com a anisotropia dos materiais utilizados na impressão. O fabrico por adição utiliza um processo de fabrico camada a camada para construir as peças pretendidas. Como resultado desta metodologia existe uma diferenciação de propriedades mecânicas ao longo das diferentes direções [44]. Investigações efetuadas nesta área estabeleceram alguns princípios que devem ser tidos em conta na impressão de modelos 3D utilizando a técnica de FDM [14]. Construir as peças de modo a que as fibras fiquem alinhadas axialmente com as zonas solicitadas à tração; Ter em consideração a concentração de tensões existente nos cantos arredondados, isto acontece porque os filamentos depositados dentro da mesma camada exibem descontinuidades nestas transições (ver Figura 2.9); Utilizar uma distância entre filamentos impressos no mesmo plano negativa, em inglês *Air Gap*, para aumentar a resistência e a rigidez; Pequena largura do filamento aumenta o tempo de construção mas melhora o acabamento da superfície; A espessura da parede deve ser um

múltiplo inteiro da largura do filamento; Considerar o efeito da orientação da camada na exatidão da peça; Ter em atenção que a zona solicitada à tração falha primeiro que a zona solicitada à compressão.

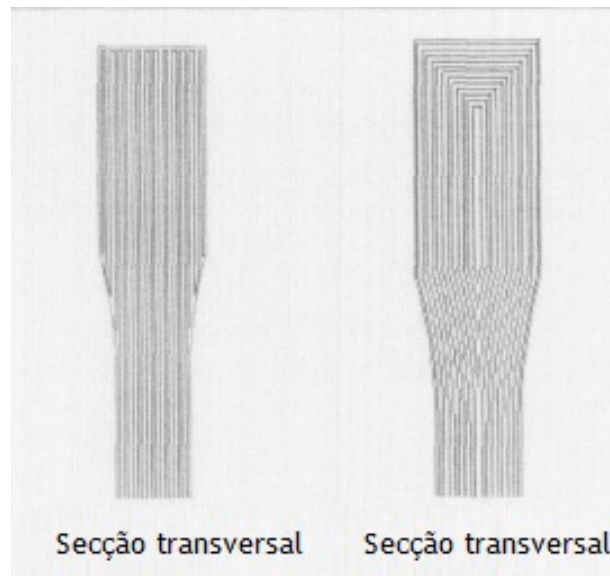


Figura 2.9: Exemplificação de concentração de tensões nos cantos, adaptado de [14].

- Porosidade induzida pela fabricação

A abordagem de fabricação camada a camada pode induzir porosidade levando a uma densificação incompleta. A formação de vazios devido a uma deposição imprópria do material pode conduzir a uma redução indesejável da resistência da peça [45]. Desenvolvimentos com vista a melhorar a densificação são requeridos para evitar discrepâncias entre os objetos projetados e aqueles realmente impressos.

- Caracterização dos materiais

Dados suficientes e fiáveis sobre as propriedades dos materiais utilizados no fabrico aditivo são necessários para uma boa análise com recurso a elementos finitos. O conhecimento insuficiente sobre as propriedades do material pode levar a previsão incorreta de resistência do mesmo [45]. Uma caracterização detalhada das propriedades do material impresso nas diferentes direções ajudará a acautelar algumas limitações.

- Pequeno volume de construção

As plataformas de construção existentes atualmente são relativamente pequenas o que levanta problemas de montagem e flexibilidade, uma vez que os UAV's têm de ser divididos em secções menores. Montagem de peças menores não só introduz complexidade, mas também aumenta o peso total, dado que é necessário recorrer a fixadores [45]. A fabricação de UAV's beneficiaria indubitavelmente de plataformas de fabrico aditivo maiores.

- Certificação e garantia de qualidade

A certificação e a garantia de qualidade são um passo fundamental antes do fabrico por adição ser comercialmente aceite na indústria aeronáutica. É necessário garantir qualidade e controlo dos materiais utilizados nos métodos de fabrico aditivo. Até ao momento, apenas existe um material termoplástico certificado para uso aeroespacial, sendo ele o ULTEM.

- Custos de material e fabricação

Estudos de mercado efetuados mostram que o fabrico aditivo é mais económico quando o volume total de construção é inferior a 130 unidades [1]. Como discutido anteriormente, as técnicas de fabrico aditivo eliminam a necessidade de ferramentas de desgastes. Com este custo fora da equação, o custo de fabricação por unidade para AM torna-se relativamente constante. No entanto, os custos dos materiais para fabrico aditivo são mais elevados comparando com outras técnicas convencionais. Isso ocorre porque processos adicionais são necessários para tornar o material adequado para impressão 3D. Isto torna o fabrico por adição numa solução menos viável economicamente para elevados volumes de construção (ver Figura 2.10). Contudo, prevê-se que o custo do material e equipamento continue a diminuir à medida que o fabrico aditivo se torne mais comum, diminuindo assim o custo de fabricação.

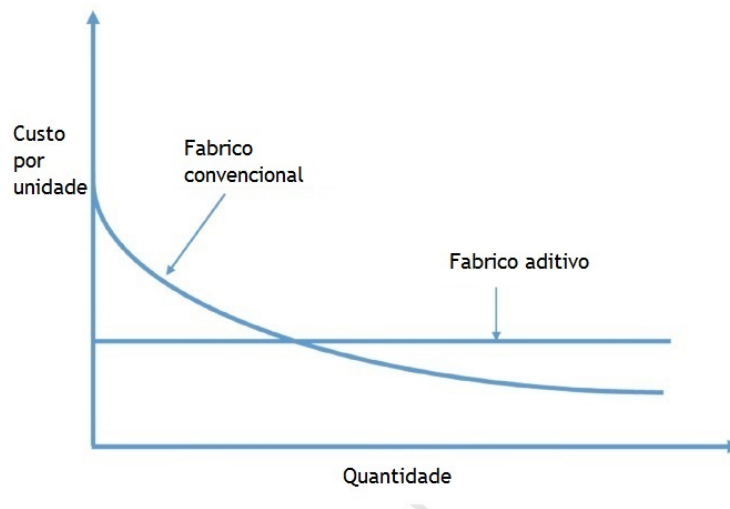


Figura 2.10: Evolução do preço por unidade de acordo com o número de unidades produzidas para fabrico tradicional e fabrico aditivo, adaptado de [1].

## 2.7 Configuração estrutural de nervuras

As nervuras são componentes que juntamente com as longarinas e tensores longitudinais completam a estrutura de uma asa. Normalmente estas estendem-se desde o bordo de ataque até à longarina traseira ou até ao bordo de fuga da asa. As nervuras conferem à asa a sua curvatura e transmitem os esforços da casca e tensores longitudinais para as longarinas. Estas são tradicionalmente construídas a partir de madeira ou metal. As suas topologias possuem regularmente furos para reduzir o peso da asa sem alterar a sua resistência. Adicionalmente, estas são cortadas para permitir a passagem de combustível e/ou equipamentos.

Na Figura 2.11 estão representados alguns dos conceitos mais utilizados para a topologia de uma nervura. A topologia A representa uma configuração em treliça, na qual os rectângulos escuros representam as longarinas dianteira e traseira. Realçar ainda que existem pequenos reforços nas raízes dos elementos das treliças. A topologia B representa igualmente uma configuração em treliça. No entanto, esta topologia difere da anterior devido à presença de um reforço contínuo ao longo da linha da corda. Este reforço fornece um suporte maior em toda a nervura à custa de um peso adicional relativamente baixo. Isto ajuda a prevenir o fenómeno de flambagem e melhora a fixação entre a estrutura da nervura e a casca. Por fim, a topologia C



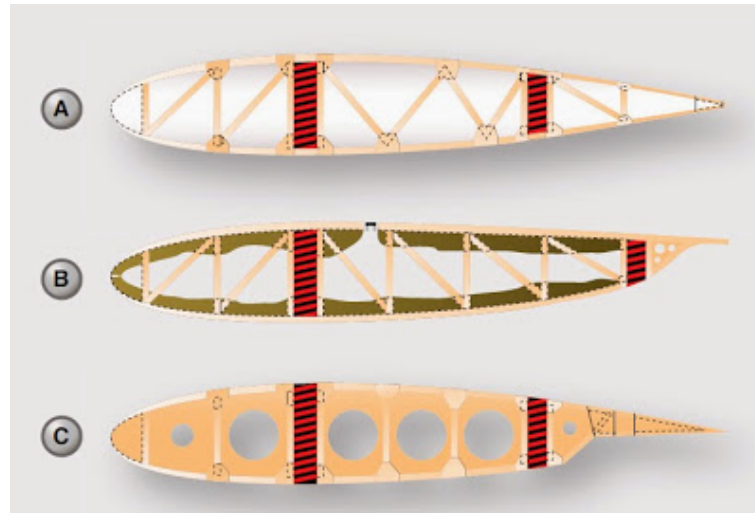


Figura 2.11: Exemplos da estrutura de nervuras [46].

representa uma nervura com uma estratégia de “lightening hole”, na qual uma série de círculos são dispostos ao longo da linha da corda. Esta configuração possui ainda alguns reforços junto às linhas do extradorso e intradorso. Nervuras de asas com localizações ou funções específicas possuem nomes que reflectem a sua singularidade. Por exemplo, nervuras que estão localizadas inteiramente a montante da longarina dianteira, usadas para moldar e fortalecer o bordo de ataque, são designadas por nervuras de nariz. Para concluir as principais funções estruturais da nervura são apresentadas de seguida [47]:

- Manter o perfil aerodinâmico da asa;
- Transferir as cargas aerodinâmicas da casca para a longarina;
- Conferir estabilidade contra a flambagem dos painéis da asa;
- Transferir cargas locais para a longarina: Trem de aterragem, Ailerons, Flaps, entre outros;
- Vedar tanques de combustível.

## 2.8 Modelos de Otimização Topológica

A otimização topológica combina o Método de Elementos Finitos com fórmulas matemáticas de otimização, com intuito de proporcionar a melhor distribuição de material do espaço fixo de projeto. As simulações estruturais tradicionais permitem avaliar se uma determinada topologia suporta as cargas requeridas. Por outro lado, o módulo de otimização topológica permite ao utilizador gerar uma nova distribuição de material utilizando as condições de fronteira e o carregamento como entradas, sendo essa nova disposição de material gerada com base em condicionalismos definidos à priori. Por norma, o resultado pretendido é uma redução do peso do componente sem que as tensões e as deformações presentes no mesmo ultrapassem os limites definidos pelo utilizador. Os componentes otimizados geralmente possuem estruturas complexas. No entanto, devido aos desenvolvimentos na área do fabrico aditivo, estes podem ser fabricados sem qualquer tipo de condicionalismo. Esta conjugação entre otimização topológica e fabrico aditivo representa um processo com elevada potencialidade. Contudo existem alguns problemas que necessitam de ser resolvidos para retirar todos os benefícios da impressão 3D

de componentes resultantes de um processo de otimização topológica. Estes problemas estão sobretudo relacionados com a anisotropia dos materiais impressos, uma vez que existe uma forte dependência das propriedades do material com os parâmetros de fabrico, nomeadamente velocidade de impressão, orientação das camadas, entre outros. A resolução destas adversidades pode passar pelo desenvolvimento de métodos de otimização mais robustos ou então pela integração do processo de modelação na otimização estrutural [48]. No que diz respeito aos modelos de optimização topológica existentes, estes podem ser divididos de acordo com o tipo de topologia envolvida. Existem 4 grandes grupos sendo eles designados por IS (Isotropic Solid), ISE (Isotropic Solid Empty), ASE (Anisotropic Solid Empty) e por fim ISEP (Isotropic Solid Empty Porous) que engloba também os modelos ISEC (Isotropic Solid Empty Composite) e ISECP (Isotropic Solid Empty Composite-Porous). Nesta terminologia cada sigla possui um significado particular, sendo eles os seguintes:

- Solid, se for constituído unicamente por um material;
- Empty, se não contém material;
- Porous, se contém apenas um material e permite cavidades ou espaços vazios.
- Composite, se contém mais que um material mas não possui cavidades ou espaços vazios.
- Composite-Porous, se contém mais que um material e possui cavidades ou espaços vazios.
- Isotropic, material com propriedades constante em todas as direcções.
- Anisotropic, propriedades do material variam consoante a posição.

As características fundamentais de cada uma das metodologias de optimização topológica estão representadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Propriedades das várias metodologias de optimização topológica, adaptado de [49].

	ISE	IS	ASE	ISEP, ISEC, ISECP
Cavidade/espaço vazio permitido	Sim	Não	Sim	Sim
Material base	Isótropico	Isótropico	Anisótropico	Isótropico
Elementos originais	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	Não Homogéneo
Elementos homogeneizados	-	-	-	Anisótropicos Homogénios
Tipo de problema de optimização	Valor discreto	Valor discreto	Contínuo	Contínuo
Número de possíveis soluções	$(n + 1)^N$	$n^N$	Infinitas	Infinitas

Na Tabela 2.1 as variáveis  $n$  e  $N$  representam, respectivamente, o número de materiais de base e o número de elementos. Uma vez que os modelos ISE e IS são os mais utilizados atualmente, tornar-se relevante apresentar ainda uma descrição de algumas estratégias utilizadas dentro destes modelos nomeadamente, SIMP (Solid Isotropic Microstructures With Penalization), OMP (Optimal Microstructures with Penalization), NOM (Non Optimal Microstructures) e DDP (Dual Discrete Programming). As particularidades de cada uma das estratégias estão representadas na Tabela 2.2:

Tabela 2.2: Estratégias usadas nos modelos ISE e IS, adaptado de [49].

	SIMP	OMP	NOM	DDP
Microestrutura dos elementos	Sólido, Isótropico	Ótimo não homogéneo	Não ótimo não homogéneo	Sólido, Isótropico
Penalização adicional	Sim	Sim	Não	Não necessário
Homogeneização necessária	Não	Sim	Sim	Não
Número de parâmetros livres por elemento	1	2D: 3 ou 4 3D: 5 ou 6	>1	1
Disponível para	Todas as combinações de constrangimentos de projeto	Projetos compatíveis	Todas as combinações de constrangimentos de projeto	Projetos compatíveis
Penalização suficiente	Sim	Sim	Não	-

Após a apresentação das singularidades ligadas a cada uma das estratégias utilizadas nos métodos ISE e IS é importante referir o que representam algumas dessas características. O conceito de penalização adicional representa um índice que penaliza os casos em que a optimização propõe regiões com densidades entre 0 e 1, zonas essas que não possuem significado físico. Adicionalmente, são apresentadas as vantagens e as desvantagens das estratégias SIMP, OMP e NOM (ver Tabelas 2.3 e 2.4).

Tabela 2.3: Vantagens relativas das estratégias SIMP, OMP e NOM, adaptado de [49].

SIMP	OMP	NOM
Eficiência computacional		
Válido para qualquer condição de projeto		
Penalização ajustável	Informação adicional acerca da solução ótima da topologia ISEP	Potencial menor número de variáveis por elemento comparado com o OMP
Simplicidade conceptual		
Convexidade pode ser preservada		
Homogeneização não necessária		

Tabela 2.4: Desvantagens relativas das estratégias SIMP, OMP e NOM, adaptado de [49].

SIMP	OMP	NOM
	Esforço computacional superior	
	Restrição para projetos compatíveis	Mais variáveis por elemento que o SIMP
	Requer matemática avançada para derivar as microestruturas ótimas	Penalização fixa e por vezes insuficiente
Solução dependente do grau de penalização	Intrinsecamente não convexo	Intrinsecamente não convexo
	Requer homogeneização	Requer homogeneização
	Solução dependente do grau de penalização	

A principal ideia do método de homogeneização, associado às estratégias OMP e NOM, é substituir o problema difícil de distribuição de material por um problema mais fácil de "dimensionamento" da densidade e propriedades efetivas de um material compósito perfurado obtido através de pequenos orifícios no material homogéneo original [50]. Um problema de optimização é definido pela resolução da porosidade ideal do meio identificado. Se uma porção de meio poroso consiste apenas em espaços vazios, a estrutura não é colocada ali. Por outro lado, se nenhuma porosidade for realizada noutra secção, uma estrutura "sólida" deve ser colocada sobre

esse espaço [51]. Na estratégia NOM a solução é otimizada usando para cada elemento finito uma microestrutura ideal, derivada rigorosamente para o tipo específico de restrições de projeto e função objetivo. A OMP está atualmente restrita à conformidade ou projetos equivalentes, porque a microestrutura ideal não é conhecida para condições de projeto mais exigentes [49]. No que diz respeito à estratégia NOM, o facto da microestrutura não ser ótima garante um certo grau de penalização "fixo", mas este é geralmente inadequado [49]. A convexidade associada à estratégia SIMP está relacionada com o facto de a penalização para densidades intermédias ser ajustável permitindo assim a procura de diversas soluções enquanto que nos restantes métodos existe a possibilidade de a solução encontrada ser apenas um mínimo local e não o mínimo global da função objetivo.

## 2.9 Conclusão

A impressão 3D pode constituir no futuro um procedimento que conduza à melhoria quer da eficiência estrutural quer da aerodinâmica.

- Melhoria da eficiência estrutural

A eficiência estrutural de um UAV pode ser melhorada por dois métodos distintos, a utilização de estruturas mais leves ou a utilização de materiais com alta resistência específica. Variando livremente o tamanho e o tipo de estrutura interna existente nos diferentes componentes confere-se uma maior flexibilidade no projeto, podendo com isso encontrar uma solução mais otimizada. No entanto, estruturas otimizadas com tamanhos e orientações diferentes ao longo da sua estrutura interna são difíceis de fabricar através de métodos convencionais. O fabrico aditivo, por seu lado, pode fabricar este tipo de estruturas otimizadas com relativa facilidade [52]. A indústria aeronáutica tem recentemente avançado para a utilização de materiais compósitos que combinam inúmeras vantagens nomeadamente, alta resistência, baixo peso, boa resistência à fadiga. O material de CFRP é conhecido por alta resistência específica devido à sua estrutura única resultante da combinação de uma fibra com uma resina. O CRFP é um material que apresenta potencialidade para ser fabricado com recurso ao fabrico aditivo através das técnicas de FDM e SLA, sendo a sua resistência à tração sensivelmente  $100\text{ MPa}$ . Estudos realizados indicaram que a baixa resistência à tração do material está relacionada com a baixa resolução da impressora. Sendo assim, o desempenho do CFRP está limitado pela capacidade da impressora e não pelo material [53].

- Melhoria da eficiência aerodinâmica

Sabe-se que a coeficientes de sustentação elevados, o arrasto induzido representa uma componente relevante do arrasto final. Por conseguinte, é desejável reduzir este arrasto induzido. A asa ótima apresenta uma geometria tridimensional muito complexa. No entanto, a sua forma é difícil de fabricar utilizando técnicas convencionais, mas pode ser conseguida através do uso de fabrico aditivo. Outro desafio inerente da impressão 3D com vista ao melhoramento da eficiente aerodinâmica é a impressão de materiais inteligentes. Com estes materiais é possível modificar a forma exterior da aeronave para se adaptar as diferentes condições de voo, maximizando assim o desempenho em vários regimes de operação.

Na Tabela 2.5 está presente um resumo das principais técnicas utilizadas na indústria aeronáutica, assim como as suas vantagens e desvantagens. Estão também indicados exemplos de UAVs ou componentes fabricados com recurso a essas mesmas técnicas.

## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

Tabela 2.5: Resumo das diferentes tecnologias utilizadas na impressão 3D e aplicações já existentes na indústria aeronáutica, adaptado de [1].

Tecnologias de fabrico aditivo	Vantagens	Desvantagens	Nome de UAV's, componentes impressos	Referências
FDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material de alta resistência tais como ULTEM;</li> <li>• ABS oferece uma maior resistência ao impacto comparado com Balsa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efeito de degrau na direção z;</li> <li>• Acabamento superficial deficitário quando comparado com Polyjet e SLA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrutura de UAV totalmente impressa;</li> <li>• AMRC UAV;</li> <li>• Entomopter;</li> <li>• FWAV.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>[45]</li> <li>[54]</li> <li>[55]</li> <li>[56]</li> </ul>
Polyjet	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidade de impressão com vários materiais;</li> <li>• Bom acabamento de superfície;</li> <li>• Efeito de escada insignificante;</li> <li>• Capacidade de imprimir traços finos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de recuperação lenta em condições de carga elevada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrutura de asa em treliça;</li> <li>• Morcego de asa batente;</li> <li>• Réplica da asa de um inseto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>[57]</li> <li>[58]</li> <li>[59]</li> <li>[60]</li> </ul>
SLA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bom acabamento de superfície;</li> <li>• Efeito de escada insignificante;</li> <li>• Precisão da impressão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação dos materiais fotossensíveis;</li> <li>• Baixa resistência à tração do material.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protótipo para teste em túnel de vento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>[61]</li> <li>[62]</li> </ul>
SLS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidade de impressão de componentes com boa resistência mecânica;</li> <li>• Área de construção elevada;</li> <li>• Relativo baixo custo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superfície de acabamento rugoso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de baixa escala para ensaio em túnel de vento;</li> <li>• Spotter UAV.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>[63]</li> </ul>



## Capítulo 3

### Caso de estudo

#### 3.1 Contextualização

Neste capítulo pretende-se apresentar qual o caso de estudo analisado e a razão para a sua escolha. Tendo em conta as ilações retiradas do capítulo 2 decidiu-se proceder à construção de uma nervura com recurso ao fabrico aditivo. Esta escolha teve como fator preponderante a facilidade de construção de geometrias complexas associadas a este método de fabrico. No que concerne à tecnologia utilizada a escolha recaiu pelo processo de FDM, uma vez que esta representa a tecnologia cujo acesso é mais facilitado e os custos associados são mais baixos. Tal como descrito na secção 2.7, a estrutura de uma nervura encontra-se normalmente ligada a outro componente estrutural da asa designado por longarina, podendo inclusivé existir mais do que uma. A colocação desses mesmos componentes pode assumir diversas posições ao longo da linha da corda e diferentes configurações. No caso de estudo desta dissertação optou-se por posicionar uma única longarina, situada a 25% da corda, de formato circular com um diâmetro de 25 mm. A elaboração das topologias das nervuras foi realizada em dois processos distintos. Algumas topologias foram concebidas com base em configurações estruturais típicas e as restantes foram idealizadas com recurso a um método de otimização estrutural. O dimensionamento das nervuras impressas em 3D, teve como base os dados da aeronave utilizada no Air Cargo Challenge 2017. O objetivo desta competição é projetar uma aeronave capaz de levantar a máxima carga útil possível, dentro de determinadas especificações. Devido às restrições do tamanho de impressão foi utilizada uma corda inferior àquela realmente construída na aeronave. A estrutura da asa desta aeronave foi fabricada com recurso a métodos de fabrico convencionais nomeadamente, máquinas de corte a fio quente e a laser e ferramentas de corte manuais. Adicionalmente, no presente estudo, simplificou-se a composição da asa sendo assumida uma asa rectangular sem diedro e sem enflechamento para facilitar o cálculo do carregamento na nervura. Os dados referentes à aeronave que foram utilizados constam na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dados do UAV utilizados para o cálculo do carregamento.

Dados	Valor
Peso máximo à descolagem [N]	147,5
Fator de carga máximo	3
Envergadura [m]	4
Corda [m]	0,25

De referir ainda a espessura da nervura  $e_n$  considerada foi 2 mm, sendo definido um espaçamento entre nervuras consecutivas  $d_n$  de 100 mm, ou seja, ao longo da asa estariam distribuídas 41 nervuras. Por fim, devido à ausência de dados finais acerca do perfil utilizado recorreu-se a um perfil adotado em edições anteriores (ver Figura 3.1.)

Posteriormente, verificou-se a necessidade de simplificar o carregamento aplicado na nervura por forma a viabilizar a validação experimental do modelo numérico, esta simplificação encontra-se detalhada na secção 3.3. Para efetivar este processo foi necessário introduzir geometrias

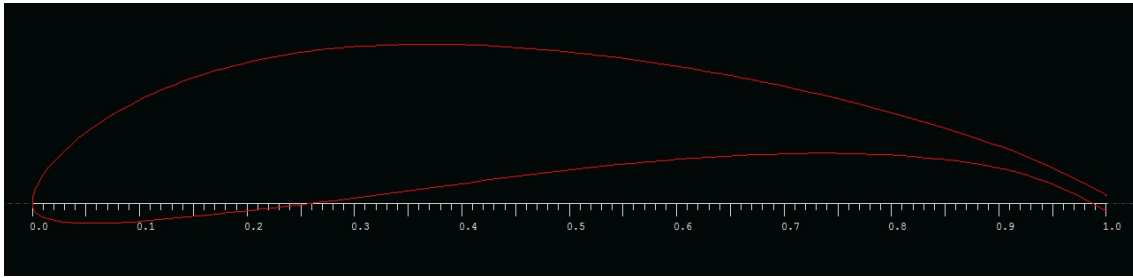


Figura 3.1: Imagem do perfil utilizado recorrendo ao software XLF5.

adicionais na nervura. Esta modificação na nervura passou pela colocação de dois olhais (ver Figura 3.2), junto aos bordos de ataque e fuga, com o objetivo de aproximar o carregamento distribuído associado à força de sustentação por cargas pontuais passíveis de reprodução experimental.

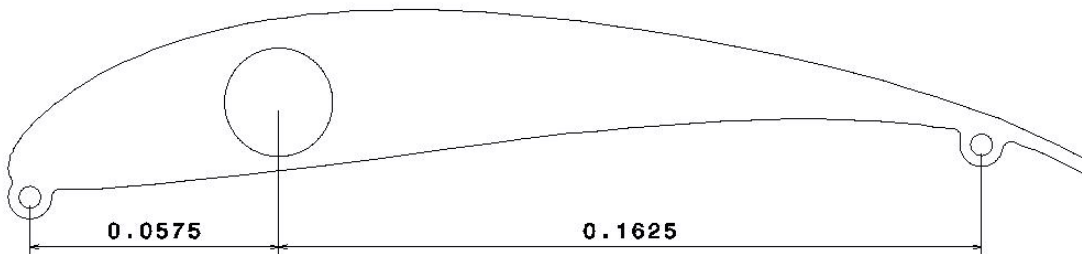


Figura 3.2: Distâncias em metros entre as cargas pontuais e a posição da longarina.

### 3.2 Seleção dos materiais e suas propriedades

No que diz respeito aos materiais utilizados no processo de fabrico aditivo existiam duas escolhas possíveis. ABS e PLA foram os materiais sobre os quais incidiu uma análise mais aprofundada das suas propriedades, de modo a encontrar qual deles seria o mais indicado para cumprir os objetivos deste trabalho. ABS é um material amplamente utilizado no sector da impressão 3D feito à base de petróleo, estando desde cedo ligado ao desenvolvimento deste setor. Este funde consistentemente quando atinge uma temperatura de 225 °C. No que diz respeito às suas propriedades mecânicas é um material relativamente rígido e um pouco flexível. Possui uma temperatura de transição de aproximadamente 100 °C, ou seja, a partir desta temperatura o plástico deixa de estar inteiramente no estado sólido e passa para um estado flexível, podendo assim perder a forma. Essas características significam que o ABS é adequado para peças funcionais de impressão 3D, como peças sobressalentes para máquinas ou objetos expostos a altas temperaturas, como a luz solar ou a água quente. O ABS é solúvel na acetona, característica esta utilizada frequentemente para suavizar a superfície da impressão. As desvantagens do ABS são o cheiro que produz quando é aquecido produzindo inclusive vapores tóxicos, e o facto de que ele se expande e encolhe no processo de aquecimento e arrefecimento. A contração, em particular, é um problema para a impressão em 3D, porque faz com que as impressões 3D se enrosquem enquanto arrefecem muito rapidamente, o que confere deformações às peças finais, facto este que deve ser evitado ao máximo. Para combater isso, o ABS deve ser impresso numa placa de construção aquecida, de preferência numa câmara de construção fechada e aquecida, para



que fique quente durante a impressão e possa arrefecer devagar quando a impressão estiver concluída. No entanto, esta solução aumenta o preço de uma impressora 3D e usa consideravelmente mais eletricidade. Outro facto negativo associado ao ABS é o fosso existente em termos ambientais entre ele e o PLA. No entanto, existem já no mercado uma versão designada por ABS Enviro, sendo este o primeiro ABS biodegradável no mercado. O Enviro reduz o impacto ambiental da impressão 3D com ABS, ao mesmo tempo que fornece materiais de alta qualidade e processos de extrusão disponíveis. Por outro lado, o PLA é um termoplástico completamente diferente sendo este biodegradável, criado a partir do processamento de produtos vegetais, incluindo milho, batata ou beterraba açucareira. O ponto de fusão é ligeiramente mais baixo que o ABS, fundindo a uma temperatura de aproximadamente 200 °C. Ao contrário do que acontece no material anterior o PLA aquando da sua fundição não apresenta nenhum cheiro desagradável nem nocivo. Devido à fluidez do PLA, torna-se possível imprimir objetos mais detalhados em velocidades mais altas utilizando este material. As impressões em PLA têm um acabamento superficial mais brilhante quando comparado com o ABS, mas a quantidade de brilho depende do fornecedor, da cor e da temperatura de impressão (ver Figura 3.3). O PLA não pode ser dissolvido em acetona, sendo para esse efeito utilizado hidróxido de sódio. No que concerne à temperatura de transição este apresenta uma desvantagem clara em relação ao ABS, uma vez que o PLA perda a sua integridade quando atinge uma temperatura de aproximadamente 60 °C, o que torna a sua aplicação em altas temperaturas altamente limitativa. No que diz respeito às suas propriedades mecânicas verifica-se que o PLA oferece uma maior resistência e uma rigidez superior quando comparado com o ABS.



Figura 3.3: Diferença de acabamento em termos de brilho entre PLA (esquerda) e ABS (direita) [64].

Após a descrição das principais características de ambos os materiais, foi necessário tomar uma decisão acerca do qual seria o mais indicado para o trabalho pretendido. Para esse efeito, concentraram-se as principais características na tabela 3.2 de modo a perceber quais os parâmetros que mais influenciariam a tomada de decisão. Contudo, é importante referir que os valores existentes na literatura para as propriedades são bastante díspares e a anisotropia dos materiais utilizados na impressão torna árdua a tarefa de prever com exatidão as características

mecânicas. Contudo, os valores apresentados resultam de um cruzamento de várias referências [27, 65, 66], sendo utilizados os valores médios sempre que nas referências fossem usados mais do que um caso de estudo para a previsão da mesma propriedade. Por exemplo, para a previsão da tensão de rutura foram utilizados diversos ensaios com camadas impressas em orientações diferentes, consequentemente foram obtidos valores diferentes para a propriedade em questão. Tal como supradito, para efeitos de comparação entre os dois materiais foi realizada a média dos resultados obtidos.

Tabela 3.2: Propriedades dos materiais analisados.

Propriedade	PLA	ABS
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	1, 25	1, 1
Módulo de Young [GPa]	3, 5	2
Módulo de Corte [MPa]	1287	675
Coeficiente de Poisson	0, 36	0, 37
Tensão de rutura [MPa]	73	31, 6
Temperatura de transição [°C]	60	100
Temperatura de fundição [°C]	200	225

Examinando as propriedades dos materiais em análise, verifica-se que existe uma separação entre o desempenho mecânico e o térmico dos materiais em questão. Perante uma solicitação térmica elevada conclui-se que o ABS tem um desempenho superior uma vez que possui uma temperatura de transição consideravelmente superior. No que concerne a uma solicitação mecânica o PLA confere uma maior rigidez à estrutura, ou seja, perante uma carga similar este deforma menos que o ABS resultado de um módulo de elasticidade superior. No que diz respeito à resistência verifica-se também que o PLA tem uma tensão de rutura consideravelmente superior. Por fim, o valor de densidade de ambos os materiais é bastante similar. Tendo em conta que os principais requisitos para este trabalho são uma estrutura leve e com deformações residuais de modo a não prejudicar o desempenho aerodinâmico do perfil presente na nervura, a escolha final recaiu sobre o PLA. O facto de este ser biodegradável também foi um facto diferenciador no processo de tomada de decisão.

### 3.3 Cálculo do carregamento

Para o cálculo do carregamento ao qual a nervura está sujeita foram efetuadas algumas assunções com base na literatura. A primeira delas foi assumir que a sustentação se distribui uniformemente pela envergadura da asa. No entanto, é conhecida que a distribuição de sustentação ao longo da envergadura varia de acordo com algumas propriedades geométricas da asa, nomeadamente com o afilamento, ou seja, razão entre a corda na ponta da asa e a corda na raiz (ver Figura 3.4). No que diz respeito à distribuição da mesma ao longo da corda, foi assumida uma distribuição aproximada sugerido pela literatura (ver Figura 3.5). Todas estas aproximações influenciam os resultados obtidos, sendo no entanto o objetivo minimizar a sua influência.

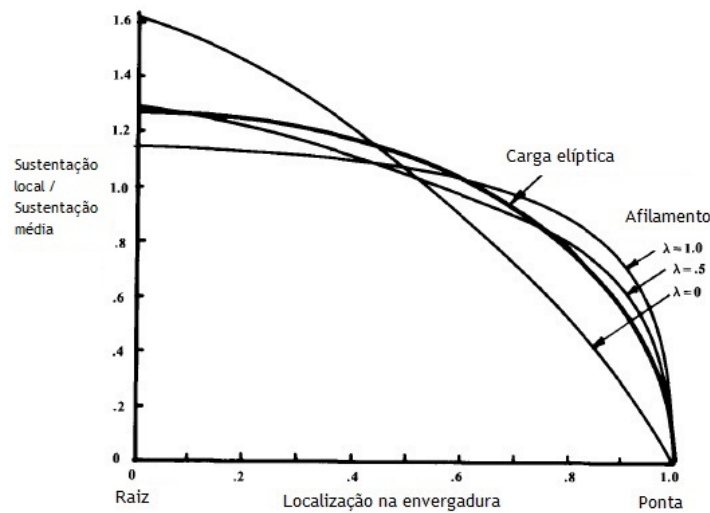


Figura 3.4: Influência do afilamento na distribuição de sustentação ao longo da envergadura, adaptado de [67].

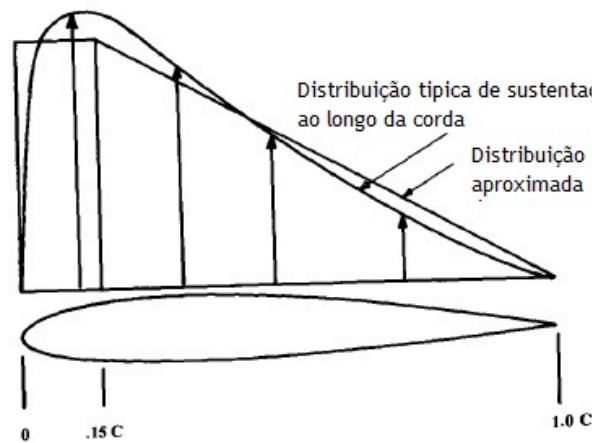


Figura 3.5: Distribuição aproximada da sustentação ao longo da corda, adaptado de [67].

Juntando os dados da aeronave representados na tabela 3.1 com as simplificações assumidas foi possível calcular o valor da pressão associado à distribuição de sustentação.

$$\frac{L}{b} = \int_0^c P \, dx \quad (3.1)$$

A dedução do valor máximo da pressão, apresentada na Figura 3.5 representado por  $P$  foi obtida com recurso à equação 3.1, onde se igualou a força de sustentação  $L$  dividida pela envergadura  $b$  ao integral da pressão ao longo da corda  $c$ . O integral é calculado com recurso ao método do trapézio, onde o valor do integral é obtido através do cálculo de áreas. O valor da força de sustentação foi obtido através do produto entre o peso máximo à descolagem da aeronave e o fator de carga. Todos estes dados encontram-se referenciados na tabela 3.1. Da resolução da equação 3.1 resultou  $P = 767.74 \, \text{N/m}^2$ . Para calcular o carregamento a que cada nervura individualmente está sujeita,  $P_{\text{nervura}}$ , multiplicou-se o valor da pressão obtido pelo intervalo

entre nervuras consecutivas  $d_n$  e dividiu-se pela espessura das mesmas  $e_n$  (ver equação 3.2).

$$P_{nervura} = \frac{P \times d_n}{e_n} \quad (3.2)$$

Da resolução da equação 3.2 resultou que  $P_{nervura} = 383587 \text{ N/m}^2$ . No que diz respeito à distribuição do carregamento entre extradorso e intradorso, este revela-se bastante dependente das características geométricas do perfil assim como do ângulo de ataque (ver Figura 3.6). No entanto, assumiu-se um modelo simplificado em que 2/3 da pressão total estão aplicados no extradorso e 1/3 no intradorso (ver Figura 3.7).

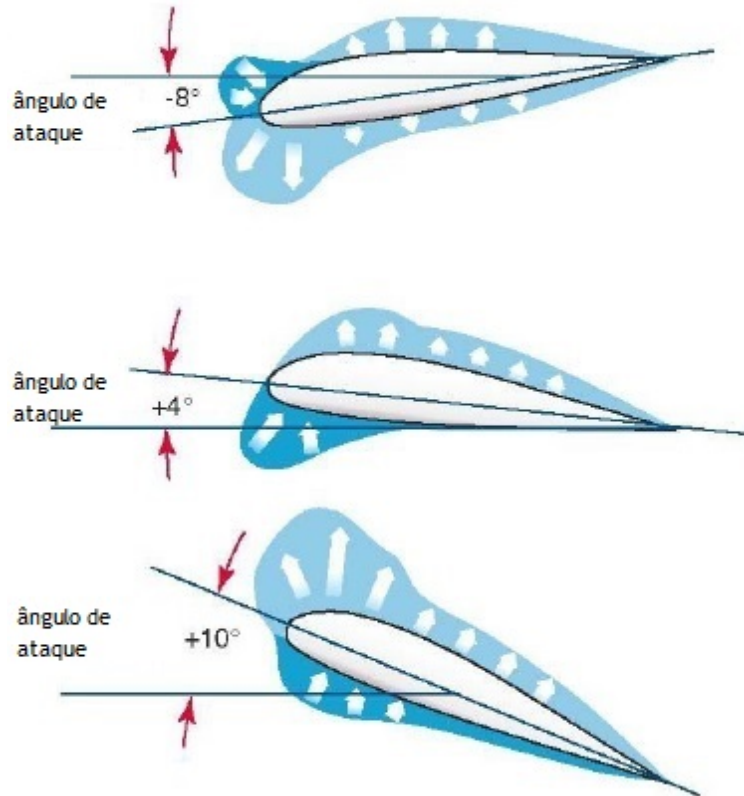


Figura 3.6: Efeito do ângulo de ataque na distribuição de sustentação entre extradorso e intradorso, adaptado de [68].

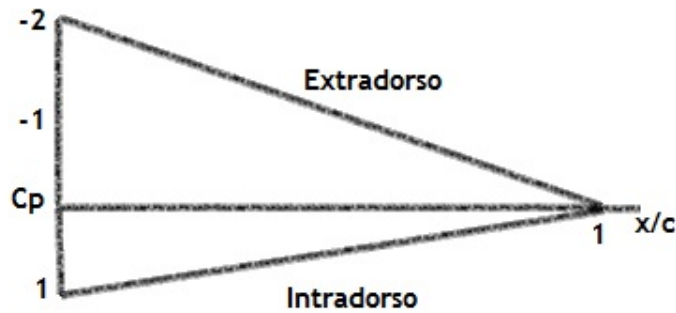


Figura 3.7: Distribuição aproximada de sustentação entre extradorso e intradorso, adaptado de [68].

Devido à impossibilidade de reproduzir experimentalmente de forma fiável uma carga distribuída semelhante à sustentação procedeu-se a uma simplificação do carregamento de modo a tornar possível a viabilização experimental dos resultados obtidos nas simulações numéricas. Esta mesma simplificação consistiu em substituir a distribuição de sustentação ao longo da corda por duas cargas pontuais, sendo estas localizadas uma a montante da longarina junto ao bordo de ataque e outra a jusante junto ao bordo de fuga. Para calcular qual a magnitude dessas mesmas forças foram feitos alguns cálculos de modo a que os momentos gerados por essas mesmas forças na longarina fossem equiparados àqueles gerados pelas respetivas distribuições. De um modo sucinto, o momento gerado pela carga pontual a montante da longarina tem de ser igual ao momento gerado pela distribuição presente desde o bordo de ataque até à posição da longarina. No que diz respeito à carga situada a jusante, o momento gerado por esta tem de ser equivalente aquele gerado pela distribuição presente desde o bordo de fuga até a posição da longarina.

O cálculo de um momento pode ser encarado como o integral de uma distribuição de força multiplicado por uma distância. Começando pelo momento a montante da posição da longarina, verifica-se que a distribuição de força  $P_m$  é constituída por duas etapas distintas. Uma etapa inicial em que a força é constante desde o bordo de ataque até 15% da corda e uma segunda em que a força possui uma variação linear desde os 15% até aos 25% da corda. O integral deste conjunto de distribuições pode ser calculado com recurso ao método do trapézio, em que o integral é obtido com recurso ao cálculo de áreas. No que diz respeito à distância  $d_m$ , esta representa a distância entre o centróide da distribuição a montante e a posição onde se pretende saber o valor do momento, neste caso a posição da longarina. Da resolução desta formulação (ver equação 3.3) conclui-se que o momento a montante da longarina é  $M_{montante} = 0,149 \text{ N.m}$ .

No que diz respeito ao momento a jusante, verifica-se que a distribuição de força  $P_j$  é apenas constituída por uma fase linear desde os 25% da corda até ao bordo de fuga. Aplicando novamente o método do trapézio e retirando o valor da distância  $d_j$  entre o centróide da distribuição a jusante e a posição da longarina (ver equação 3.4), obteve-se que o momento a jusante da longarina é  $M_{jusante} = 0,397 \text{ N.m}$ .

Para calcular o valor da força pontual a montante  $F_{pm}$  dividiu-se o valor do momento a montante  $M_{montante}$  pela distância pontual a montante  $d_{pm}$  representada na imagem 3.2, (ver equação 3.5).

Para calcular o valor da força pontual a jusante  $F_{pj}$  dividiu-se o valor do momento a jusante  $M_{jusante}$  pela distância pontual a jusante  $d_{pj}$  representada na imagem 3.2, (ver equação 3.6).

$$M_{montante} = \int_0^{0.25c} P_m dc \times d_m \quad (3.3)$$

$$M_{jusante} = \int_{0.25c}^c P_j dc \times d_j \quad (3.4)$$

$$F_{pm} = \frac{M_{montante}}{d_{pm}} \quad (3.5)$$

$$F_{pj} = \frac{M_{jusante}}{d_{pj}} \quad (3.6)$$

Tal como supradito, a simplificação efetuada na qual se substitui as cargas distribuídas por cargas pontuais foi efetuada com o objetivo de viabilizar a comparação entre os dados resultantes das simulações numéricas e dados experimentais. O caso de estudo foi então composto por duas fases distintas, uma fase inicial em que o carregamento imposto é constituído por duas forças pontuais e um segundo carregamento em que são aplicadas cargas distribuídas na estrutura da nervura. Nas Tabelas 3.3 e 3.4 estão explicados sucintamente o primeiro e o segundo carregamento.

Tabela 3.3: Primeiro carregamento analisado.

Força a montante da posição da longarina [N]	Força a jusante da posição da longarina [N]
2, 591	4, 289

Tabela 3.4: Segundo carregamento analisado.

Zona da nervura	Pressão Extradorso [Pa]	Pressão Intradorso [Pa]
$0 - 0.25 \times c$	$P_{nervura} = 25591$	$P_{nervura} = 12796$
$0.25 \times c - c$	$P_{nervura} = 34121, 3 - 136485 \times pc$	$P_{nervura} = 17061, 3 - 68245, 3 \times pc$

Na Tabela referente ao segundo carragamentmo, Tabela 3.4, é importante referir que a variável  $pc$  refere-se à posição ao longo da corda abrangida no intervalo ou seja, representa qualquer posição desde os 25% da corda até ao bordo de fuga.

# Capítulo 4

## Estudo Numérico

### 4.1 Introdução

A análise numérica teve como objetivo proceder ao estudo de várias topologias de estrutura para a nervura, com recurso a um software de elementos finitos, neste caso Ansys. O método dos elementos finitos, em inglês *Finite element method* (FEM), representa um procedimento bastante utilizado em processos de análise estrutural, o qual tem como objetivo determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais. O FEM subdivide o domínio de um problema em partes menores, denominadas elementos finitos. Estas divisões têm vários benefícios nomeadamente, representação precisa de geometrias complexas, inclusão de propriedades distintas em materiais dissimilares e identificação de efeitos localizados tais como concentração de tensões. Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos esses itens, elementos e nós, dá-se o nome de malha. Em função dessas subdivisões da geometria, as equações matemáticas que regem o comportamento físico não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico. A precisão deste método depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. De uma forma geral, quanto menor for o tamanho dos elementos e consequentemente o seu número for aumentando, maior é a precisão dos resultados. Os softwares de simulação computacional vêm evoluindo e buscam aprimorar as análises efetuadas com recurso a este método, melhorando a escolha dos tipos e a geração da malha de elementos, as técnicas de modelação, os critérios de aceitação, erros e a apresentação de resultados, facilitando a utilização desta ferramenta. Este método pode ser aplicado na resolução e diagnóstico de problemas de análise estrutural por meio a obtenção de deslocamentos, deformações e tensões, permitindo também avaliar o desempenho de produtos com a aplicação de critérios de rigidez, resistência ou fadiga. Atualmente existe uma grande integração entre softwares de representação geométrica (CAD) com sistemas baseados no método de elementos finitos CAE (Computer Aided Engineering). Esta interligação permite alcançar melhores resultados através de análises mais eficientes e ágeis. Neste capítulo são efetuadas análises estruturais com vista à determinação da energia de deformação e das distribuições de deformação e tensão de von-Mises para as dez topologias propostas. Estas mesmas análises estruturais são divididas de acordo com o carregamento imposto à nervura em conformidade com as deduções efetuadas na secção 3.3. Os resultados referentes ao primeiro carregamento são posteriormente comparados com dados experimentais no capítulo 7. Adicionalmente, uma função objetivo é criada com o objetivo de avaliar quantitativamente as soluções referentes ao segundo carregamento.

### 4.2 Caracterização do material e análises efetuadas

Um dos fatores mais importantes para uma análise estrutural eficiente é uma definição correta das propriedades do material. Tal como descrito na secção 2.6.2, os materiais utilizados na

impressão 3D possuem propriedades diferentes consoante a direção. A caracterização exata das propriedades destes materiais representa um dos maiores desafios da indústria, sendo um dos maiores temas de investigação nesta área. Estudos efetuados procuraram estabelecer relações entre as propriedades existentes na direção de impressão e as restantes direções [44]. Embora a referência citada seja para o ABS e não para o PLA, foram adotadas as relações obtidas uma vez que se tratam de materiais termoplásticos semelhantes (ver Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Relações entre as propriedades existentes na direção de impressão e as restantes direções para o ABS.

Razão	Valor
$E/E'$	1,03
$G/G'$	1,18
$\nu/\nu'$	0,72

Os índices com a presença de apóstrofe representam as propriedades na direção principal, ou seja, esta direção coincide com o eixo principal de impressão neste caso a linha da corda. Por outro lado, os índices sem apóstrofe representam as direções transversais. Efetuando o paralelismo entre o caso representado na referência e a estrutura da nervura utilizada, com o respetivo sistema de eixos representado na Figura 4.1, retirou-se as conclusões presentes na Tabela 4.2.

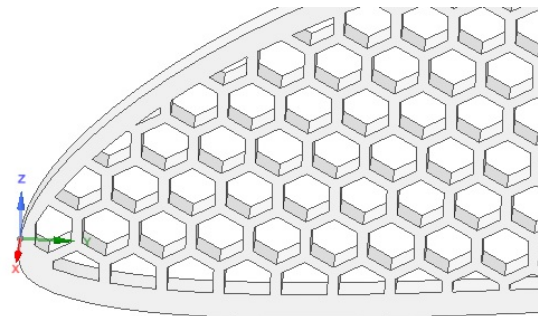


Figura 4.1: Exemplificação do sistema de eixos utilizado durante as análises numéricas.

Tabela 4.2: Correspondência entre propriedades da referência e propriedades das topologias analisadas.

Propriedade	Correspondência na configuração utilizada
$E$	$E_x E_z$
$E'$	$E_y$
$G$	$G_{xz}$
$G'$	$G_{xy} G_{yz}$
$\nu$	$\nu_{xz}$
$\nu'$	$\nu_{xy} \nu_{yz}$

Aplicando as propriedades isotrópicas descritas na secção 3.2 como representativas das características do material na direção principal foi possível obter as restantes através das relações representadas na Tabela 4.1. Deste processo de caracterização mecânica do material resultou o conjunto de propriedades descrito pela Tabela 4.3.



Tabela 4.3: Propriedades utilizadas para caracterização mecânica do PLA.

Propriedade	Valor
$E_y$ [MPa]	3500
$E_x$ $E_z$ [MPa]	3605
$G_{xy}$ $G_{yz}$ [MPa]	1287
$G_{xz}$ [MPa]	1519
$\nu_{xy}$ $\nu_{yz}$	0,36
$\nu_{xz}$	0,26

As geometrias analisadas resultaram de um conjunto de pesquisas de várias configurações utilizadas em topologias estruturais nomeadamente, treliças com e sem suportes verticais, estruturas em favo de mel, entre outras configurações. As análises efetuadas foram divididas em dois casos distintos, sendo que a diferença existente está relacionada com o carregamento, tal como descrito na secção 3.3. O primeiro carregamento corresponde à aplicação de cargas pontuais na nervura, as quais foram convertidas em pressão através da aplicação da força na superfície superior dos apoios inseridos na estrutura para a aplicação das cargas durante o procedimento experimental (ver Figura 4.2).

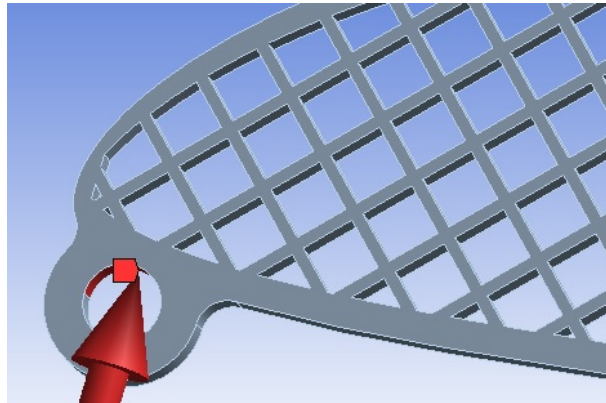


Figura 4.2: Exemplicação da aplicação das cargas pontuais nas topologias analisadas.

No que diz respeito ao segundo carregamento analisado, este foi inserido com recurso a três pontos, através dos quais foram geradas as distribuições pretendidas ou seja, uniforme deste o bordo de ataque até aos 25% da corda e linear desde esta posição até ao bordo de fuga (ver Figura 4.3).

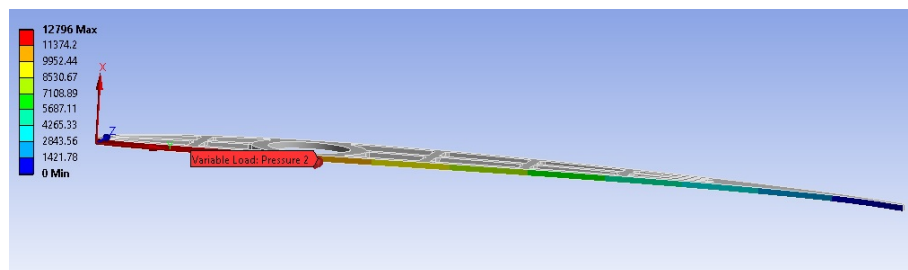


Figura 4.3: Exemplicação da aplicação da carga distribuída ao longo do intradorso das topologias analisadas.

No que concerne às condições de fronteiras utilizadas, estas são as mesmas para ambas as análises. A condição de fronteira imposta em ambas as análises é a colocação de encastramento, *fixed support*, nas faces laterais do furo destinado à posição da longarina (ver Figura 4.4). Este

tipo de condição de fronteira é inserido com o objetivo de restringir os seis graus de liberdade existentes ou seja, deformações e rotações nos eixos x, y e z.

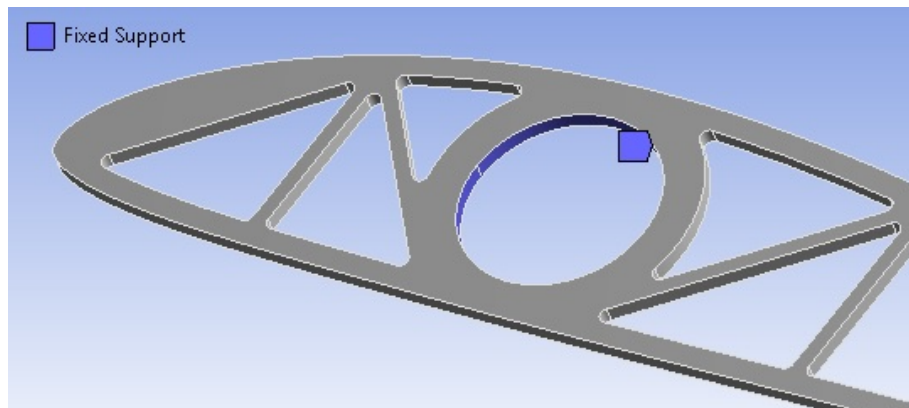


Figura 4.4: Representação das condições de fronteira utilizadas nas análises efetuadas.

A primeira configuração selecionada (ver Figura 4.5) foi considerada a topologia base. Esta topologia teve como principal objetivo obter um valor de massa de referência, permitindo assim gerar as topologias seguintes com massa semelhante, de modo a dissipar o efeito da massa nas análises de rigidez e resistência. Os critérios de rigidez e resistência selecionados foram os seguintes: deformação máxima na ordem de  $1\text{mm}$  e tensão equivalente máxima de  $36,5\text{MPa}$ . O valor máximo de deformação foi definido de modo a que a deformação provocada ao perfil não compromettesse o desempenho aerodinâmico do perfil e consequentemente não afetasse o comportamento durante a missão. Por outro lado, o valor limite de tensão foi definido de modo a que existesse um fator de segurança mínimo de 2, ou seja, a tensão máxima presente na estrutura não deveria ultrapassar metade da tensão de rutura do material. Importante referir que estes critérios foram aplicados durante a análise do primeiro carregamento, ou seja, estes foram definidos para o caso em que o carregamento se encontra simplificado através de aplicação de cargas pontuais. Posteriormente, aquando da aplicação de um carregamento mais congruente com a realidade, ou seja, durante a análise referente ao segundo carregamento, foi verificada a validade destes critérios, o que indica que a simplificação do carregamento utilizada inicialmente representa uma boa aproximação. Nas Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 temos representadas as restantes topologias analisadas. Para facilitar a descrição estas foram numerados de 2 a 10, sendo a primeira topologia aquela utilizada como referência. As topologias propostos têm como ponto comum um furo localizado a 25% da corda com um diâmetro de  $25\text{mm}$  destinado à simulação da presença da longarina. Por fim, referir que todas as topologias representadas são aquelas utilizados durante as análises referentes ao primeiro carregamento, sendo a única diferença a registar para a análise durante o segundo carregamento a remoção das superfícies presentes junto ao bordo de ataque e ao bordo de fuga utilizadas para a aplicação das cargas durante os ensaios experimentais.

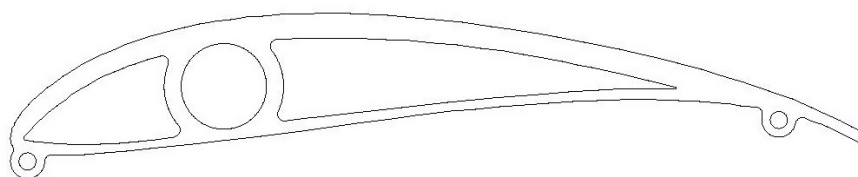


Figura 4.5: Primeira topologia utilizada para análise.

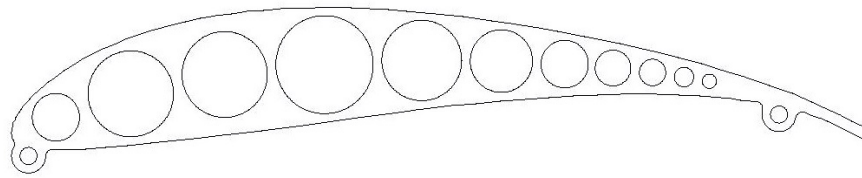


Figura 4.6: Segunda topologia utilizada para análise.

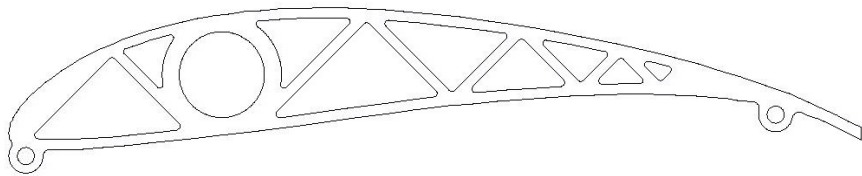


Figura 4.7: Terceira topologia utilizada para análise.

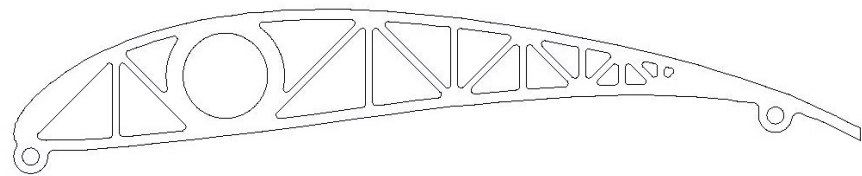


Figura 4.8: Quarta topologia utilizado para análise.

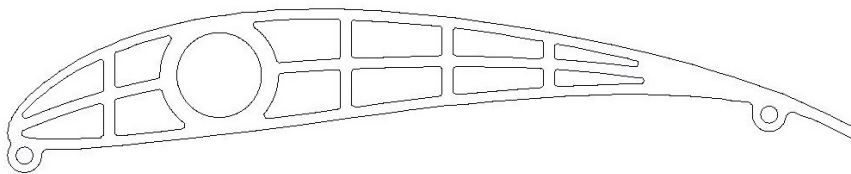


Figura 4.9: Quinta topologia utilizada para análise.

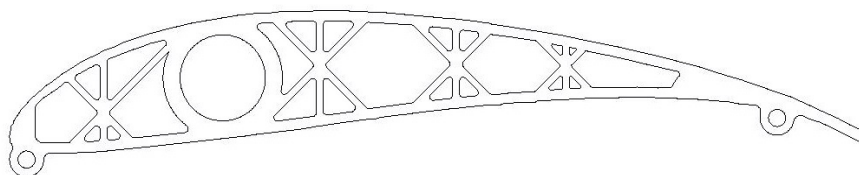


Figura 4.10: Sexta topologia utilizada para análise.

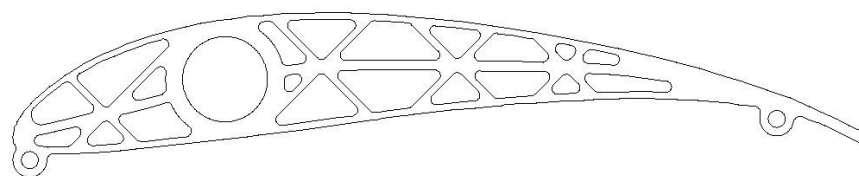


Figura 4.11: Sétima topologia utilizada para análise.

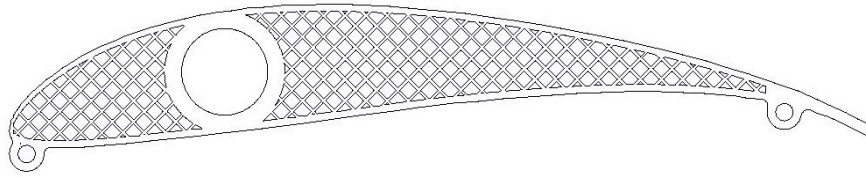


Figura 4.12: Oitava topologia utilizada para análise.

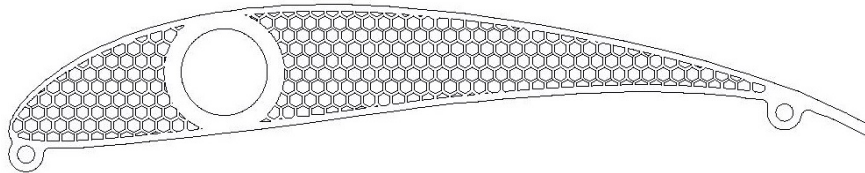


Figura 4.13: Nona topologia utilizada para análise.

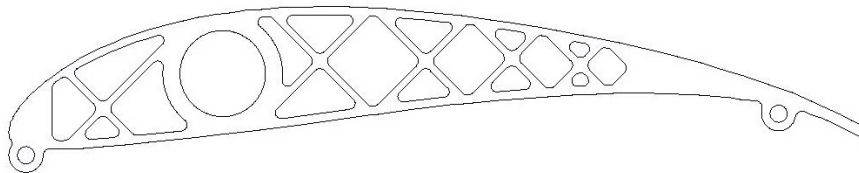


Figura 4.14: Décima topologia utilizada para análise.

### 4.3 Estudo de convergência de malha

Na modelação em elementos finitos, uma malha mais fina geralmente produz uma solução mais precisa. No entanto, à medida que uma malha se torna mais fina, o tempo de cálculo aumenta. A precisão da solução de um problema de elementos finitos depende da discretização do domínio e da ordem do elemento finito que está a ser usado. A precisão da solução pode ser aumentada recorrendo a uma malha mais fina ou a um elemento de ordem superior. Para convergir a solução para o valor correto, a malha deve ser devidamente refinada ou um elemento de ordem apropriado deve ser selecionado. Todas essas ações devem ser feitas considerando o tempo computacional. De um modo geral, essa atividade de seleção de uma malha adequada para encontrar um equilíbrio entre a precisão da solução e a eficiência computacional, é chamada de estudo de convergência de malha. O ponto de convergência de malha é geralmente definido como o ponto em que um refinamento da malha, ou seja, aumento do número de elementos, não induz alterações significativas nos resultados obtidos. O ANSYS Mechanical (Workbench) facilita a revisão da qualidade dos elementos durante o desenvolvimento do processo de seleção da malha adequada. Os elementos bem formados produzem resultados superiores e ajudam a reduzir os erros da forma do elemento. Este software disponibiliza ao utilizador vários parâmetros que permitem averiguar a qualidade da malha nomeadamente, qualidade do elemento, razão de aspecto, razão Jacobiana, factor de arqueamento, desvio paralelo, ângulo de canto máximo e assimetria. Todos os parâmetros apresentados possuem uma escala quantitativa que permite avaliar a qualidade da malha gerada. No caso deste trabalho o parâmetro selecionado foi a qualidade do elemento. Este parâmetro providencia uma escala entre 0 e 1 que permite

quantificar a qualidade do elemento gerado, sendo que quanto mais próximo o valor se encontrar da unidade mais perfeito é o elemento. O cálculo do valor associado a cada elemento é feito através de uma expressão matemática que está relacionada com o tipo de elemento gerado e a sua dimensão, estando esta representada na equação 4.1.

$$Quality = C \times [Volume / \sqrt{[\sum (edge\ length)^2]^3}] \quad (4.1)$$

A constante C varia consoante o tipo de elemento, estando descritos na Tabela 4.4 os diversos valores que esta pode assumir.

Tabela 4.4: Valores da constante C consoante o tipo de elemento.

Elemento	Valor
Triangular	6,92820323
Quadrangular	4,0
Tetraedro	124,70765802
Hexaedro	41,56921938
Prisma	62,35382905
Piramide	96

O tipo de elemento utilizado é gerado automaticamente pelo software mediante a natureza da análise pretendida e a geometria em questão. Tal como descrito na Figura 4.15 é possível quantificar o número de elementos que se enquadram num determinado grau de qualidade. Posto isto, definiu-se como critério de controlo de qualidade da malha e consequentemente o ponto onde o refinamento da malha fosse satisfatório, que no mínimo 90% dos elementos gerados apresentassem uma qualidade acima de 0,75.

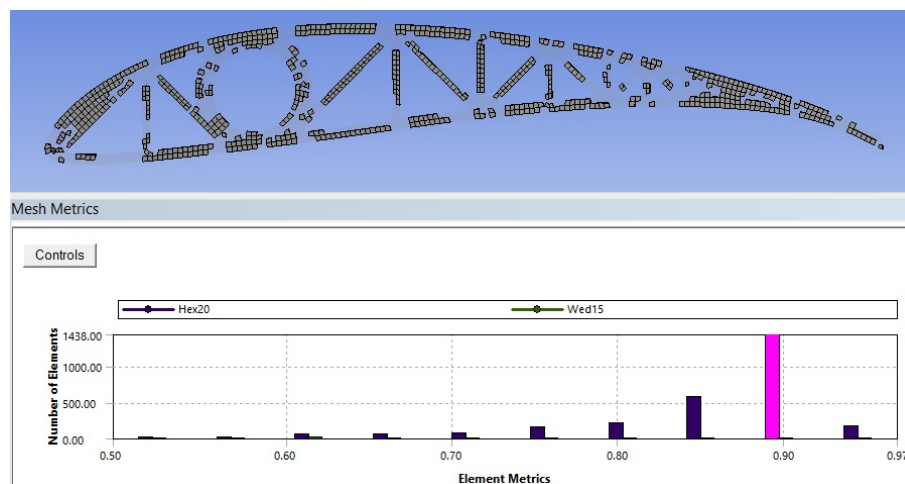


Figura 4.15: Exemplo da seleção de elementos gerados na malha com determinado índice de qualidade.

Tendo em conta as geometrias modeladas e o tipo de análise efetuadas foram gerados três tipos diferentes de elementos nomeadamente, hexaedro de 20 nós  $Hex_{20}$ , prisma de 15 nós  $Wed_{15}$  e tetraedro de 10 nós  $Tet_{10}$ , representados na Figura 4.16

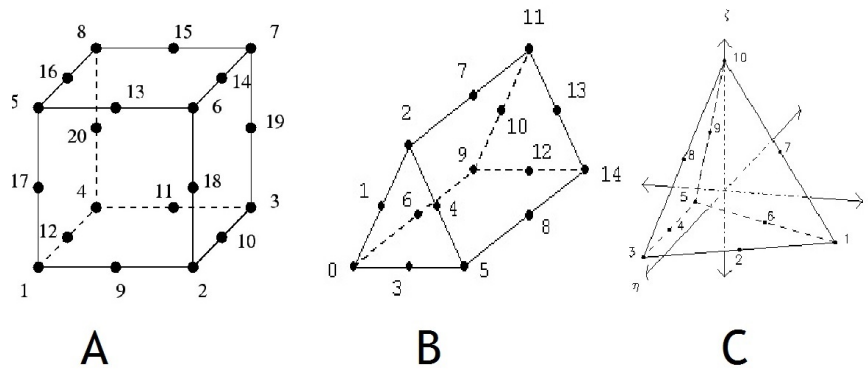


Figura 4.16: Elementos gerados durante as análises: A - Hexaedro de 20 nós; B - Prisma de 15 nós; C - Tetraedro de 10 nós.

Na Tabela 4.5 encontram-se concentrados os resultados oriundos da aplicação deste critério às diversas topologias analisadas no primeiro conjunto de análises efetuadas, sendo que os resultados do segundo conjunto de análises constam na Tabela 4.6. Ao analisar os resultados descritos nas Tabelas 4.5 e 4.6 verifica-se que para a nona topologia não foi possível aplicar o critério estabelecido para as restantes topologias. Este facto prende-se sobretudo com a complexidade geométrica da topologia em questão e com o tipo de elemento, sendo este diferenciado dos restantes gerados nas topologias remanescentes, o que não permite que os elementos atinjam um índice de qualidade elevado mesmo com uma malha bastante refinada. A malha utilizada para esta topologia durante o segundo carregamento está representada na imagem 4.17, sendo a descrição da qualidade dos elementos gerados descrita pela imagem 4.18. Verifica-se que existe uma grande quantidade de elementos que possuem uma qualidade acima de 0,5, estando sensivelmente metade destes entre 0,5 e 0,75 e outra metade entre 0,75 e 1. Esta distribuição é igualmente verificada na malha utilizada para a mesma topologia durante a análise para o primeiro carregamento.

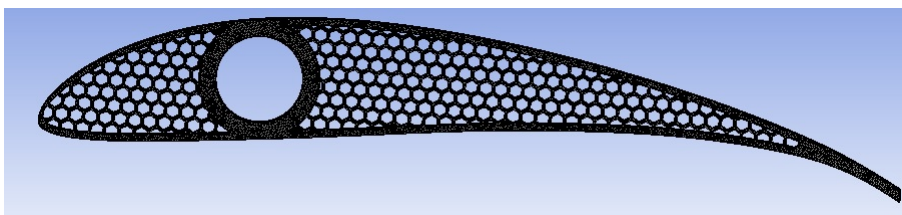


Figura 4.17: Malha utilizada na nona topologia na análise referente ao segundo carregamento.

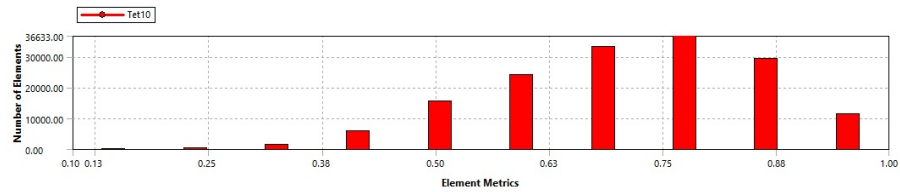


Figura 4.18: Representação da qualidade dos elementos gerados na nona topologia utilizada na análise referente ao segundo carregamento.

Tabela 4.5: Resultados da análise das malhas utilizados nas diversas topologias durante a análise correspondente ao primeiro carregamento.

Topologia	Elementos gerados	Nº total de elementos	Percentagem de elementos com qualidade acima de 0,75
1	$Hex_{20} Wed_{15}$	379	0,91
2	$Hex_{20} Wed_{15}$	801	0,95
3	$Hex_{20} Wed_{15}$	2656	0,92
4	$Hex_{20} Wed_{15}$	2876	0,90
5	$Hex_{20} Wed_{15}$	2714	0,96
6	$Hex_{20} Wed_{15}$	4248	0,95
7	$Hex_{20} Wed_{15}$	4090	0,97
8	$Hex_{20} Wed_{15}$	13482	0,94
9	$Tet_{10}$	162270	0,49
10	$Hex_{20} Wed_{15}$	3926	0,98

Tabela 4.6: Resultados da análise das malhas utilizados nas diversas topologias durante a análise correspondente ao segundo carregamento.

Topologia	Elementos gerados	Nº total de elementos	Percentagem de elementos com qualidade acima de 0.75
1	$Hex_{20} Wed_{15}$	370	0,90
2	$Hex_{20} Wed_{15}$	770	0,97
3	$Hex_{20} Wed_{15}$	2542	0,91
4	$Hex_{20} Wed_{15}$	2760	0,92
5	$Hex_{20} Wed_{15}$	2640	0,93
6	$Hex_{20} Wed_{15}$	4104	0,97
7	$Hex_{20} Wed_{15}$	3988	0,98
8	$Hex_{20} Wed_{15}$	7602	0,91
9	$Tet_{10}$	156678	0,49
10	$Hex_{20} Wed_{15}$	3838	0,98

## 4.4 Resultados das simulações

Os resultados provenientes das simulações são apresentados em duas subsecções separadas consoante o carregamento utilizado. Tal como supradito, foram estudados dois carregamentos distintos, um carregamento constituído por cargas pontuais que foi posteriormente sujeito a confrontação com dados experimentais e um segundo caso em que o carregamento utilizado foi composto por cargas distribuídas. O primeiro carregamento correspondeu ao caso em que se aplicam cargas pontuais na nervura e consequentemente o segundo englobou os casos respeitantes a aplicação de cargas distribuídas nas topologias de nervura analisados.



## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

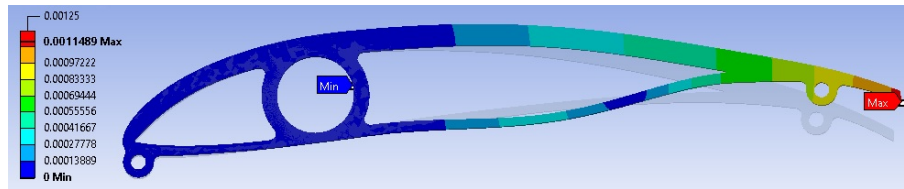


Figura 4.19: Deformação total para a primeira topologia durante o primeiro carregamento.

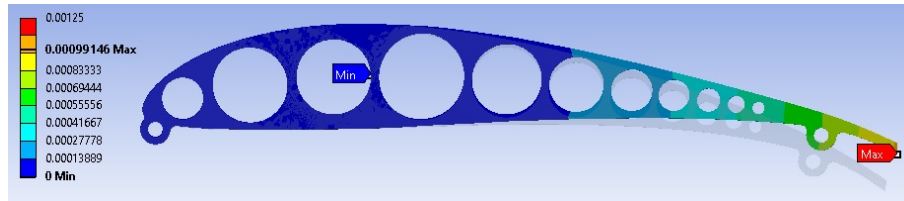


Figura 4.20: Deformação total para a segunda topologia durante o primeiro carregamento.

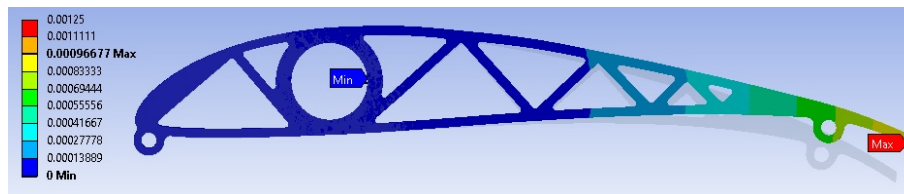


Figura 4.21: Deformação total para a terceira topologia durante o primeiro carregamento.

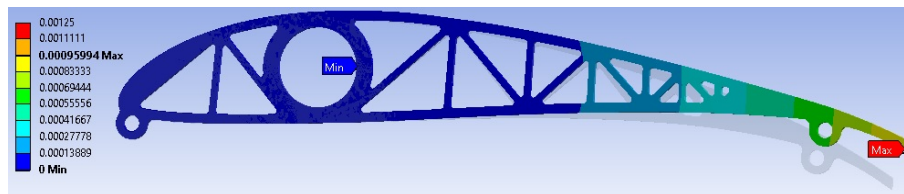


Figura 4.22: Deformação total para a quarta topologia durante o primeiro carregamento.

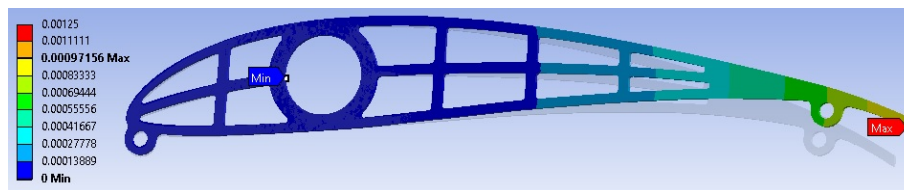


Figura 4.23: Deformação total para a quinta topologia durante o primeiro carregamento.



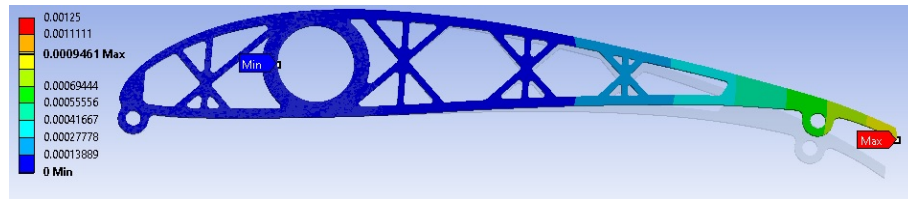


Figura 4.24: Deformação total para a sexta topologia durante o primeiro carregamento.

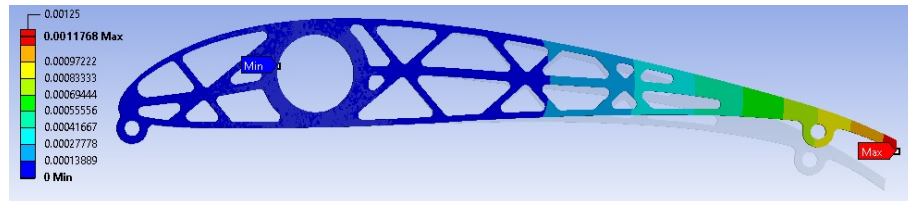


Figura 4.25: Deformação total para a sétima topologia durante o primeiro carregamento.

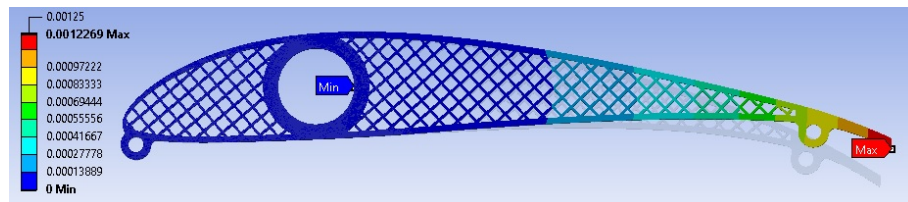


Figura 4.26: Deformação total para a oitava topologia durante o primeiro carregamento.

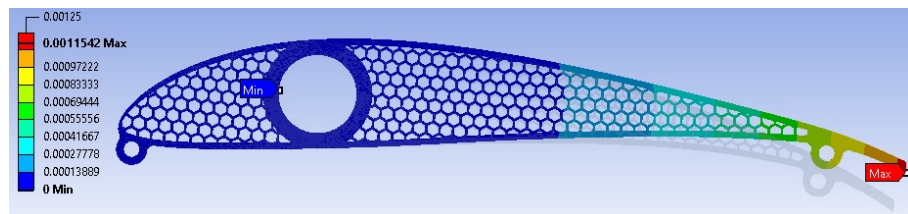


Figura 4.27: Deformação total para a nona topologia durante o primeiro carregamento.

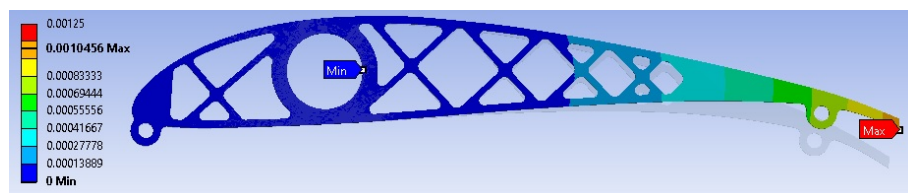


Figura 4.28: Deformação total para a décima topologia durante o primeiro carregamento.

## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

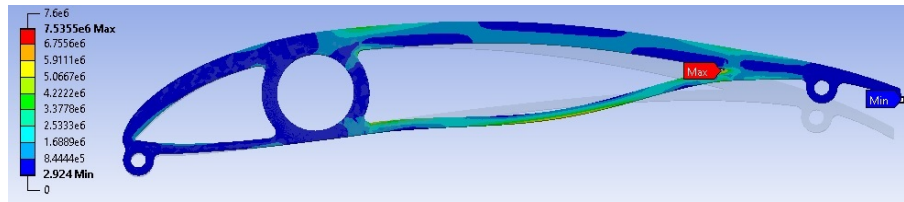


Figura 4.29: Tensão equivalente de von-Mises para a primeira topologia durante o primeiro carregamento.

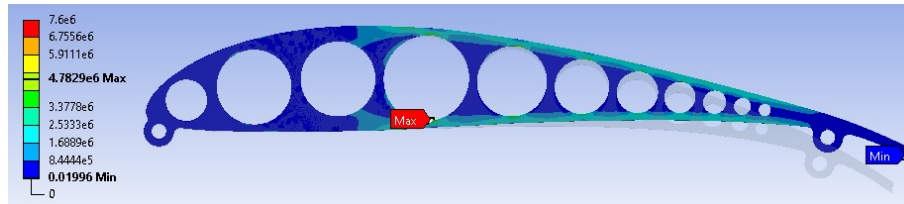


Figura 4.30: Tensão equivalente de von-Mises para a segunda topologia durante o primeiro carregamento.

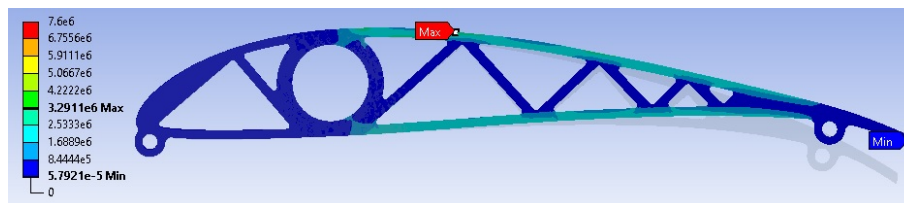


Figura 4.31: Tensão equivalente de von-Mises para a terceira topologia durante o primeiro carregamento.

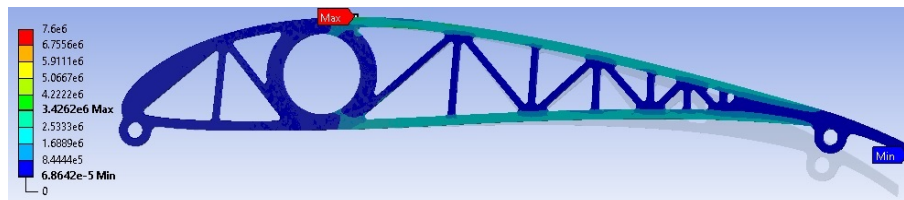


Figura 4.32: Tensão equivalente de von-Mises para a quarta topologia durante o primeiro carregamento.

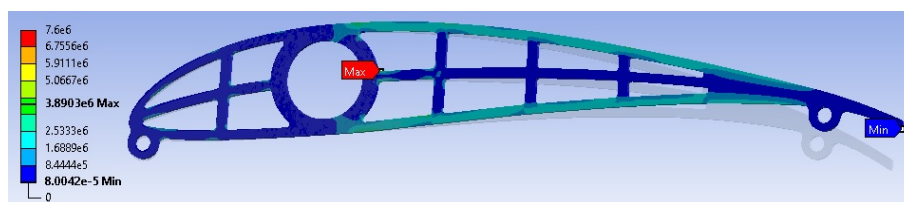


Figura 4.33: Tensão equivalente de von-Mises para a quinta topologia durante o primeiro carregamento.

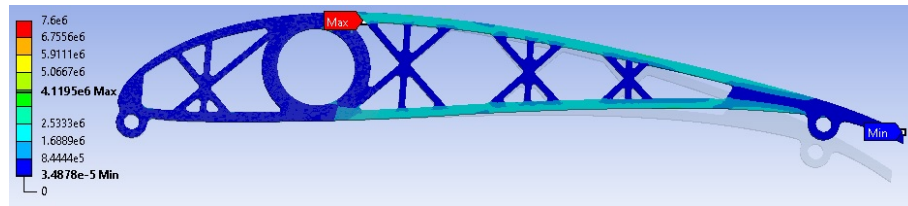


Figura 4.34: Tensão equivalente de von-Mises para a sexta topologia durante o primeiro carregamento.

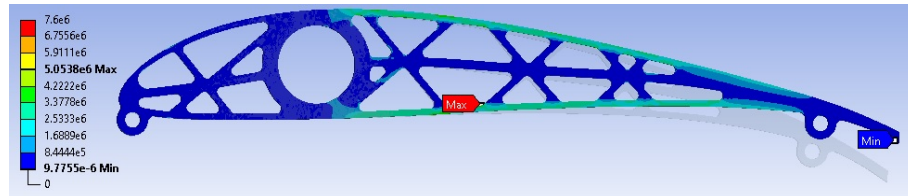


Figura 4.35: Tensão equivalente de von-Mises para a sétima topologia durante o primeiro carregamento.

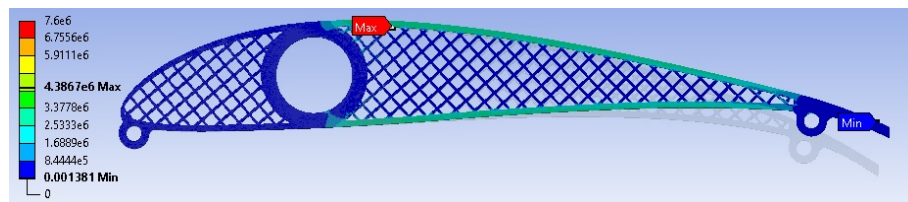


Figura 4.36: Tensão equivalente de von-Mises para a oitava topologia durante o primeiro carregamento.

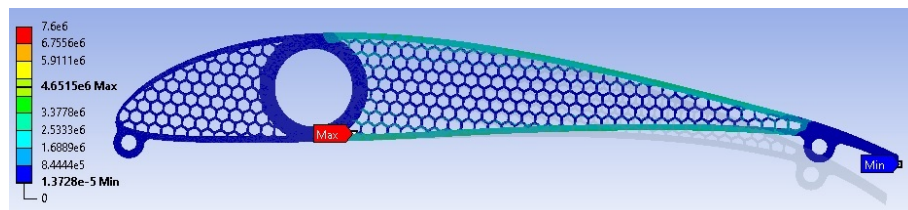


Figura 4.37: Tensão equivalente de von-Mises para o nono modelo durante o primeiro carregamento.

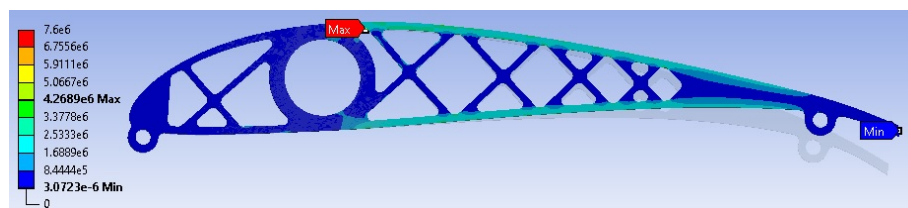


Figura 4.38: Tensão equivalente de von-Mises para a décima topologia durante o primeiro carregamento.

## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

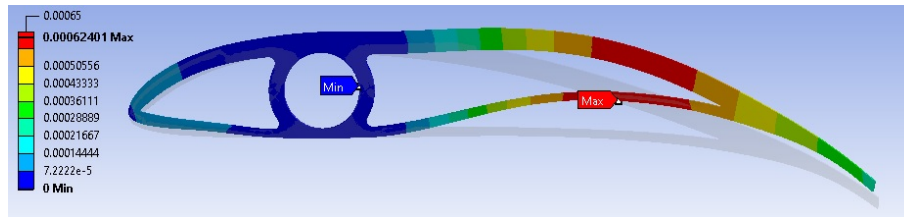


Figura 4.39: Deformação total para a primeira topologia durante o segundo carregamento.

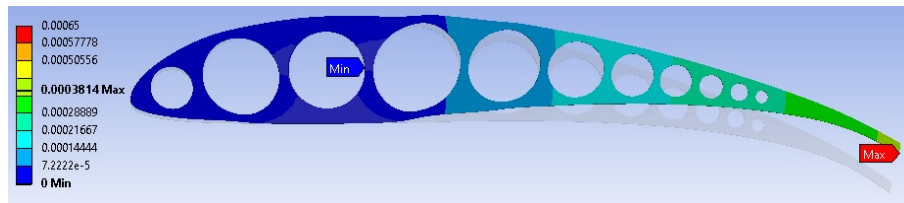


Figura 4.40: Deformação total para a segunda topologia durante o segundo carregamento.

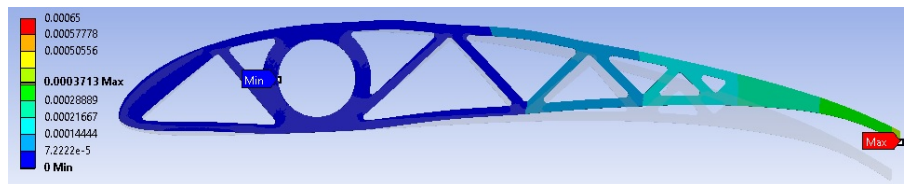


Figura 4.41: Deformação total para a terceira topologia durante o segundo carregamento.

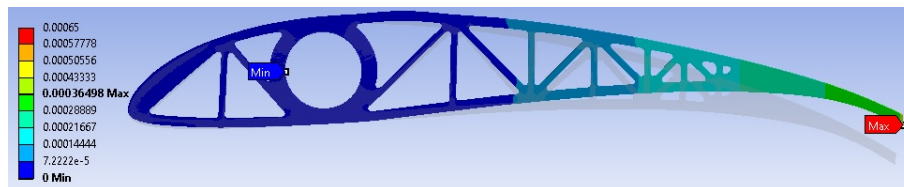


Figura 4.42: Deformação total para a quarta topologia durante o segundo carregamento.

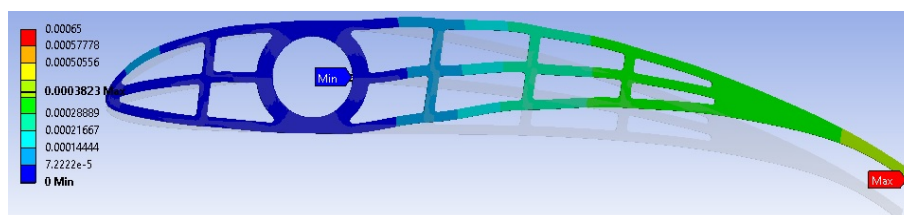


Figura 4.43: Deformação total para a quinta topologia durante o segundo carregamento.

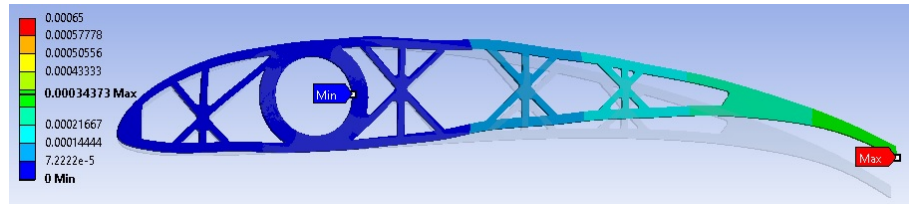


Figura 4.44: Deformação total para a sexta topologia durante o segundo carregamento.

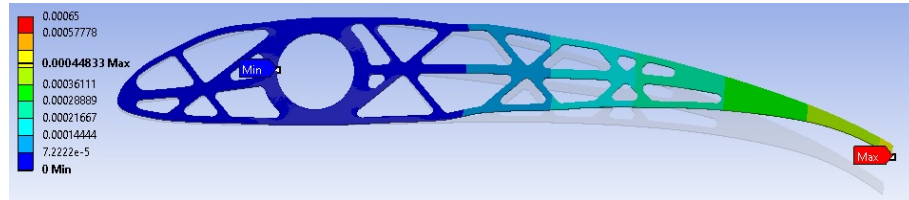


Figura 4.45: Deformação total para a sétima topologia durante o segundo carregamento.

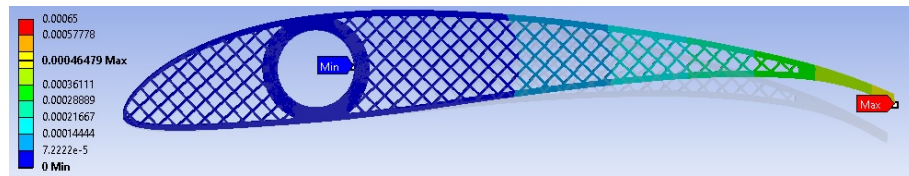


Figura 4.46: Deformação total para a oitava topologia durante o segundo carregamento.

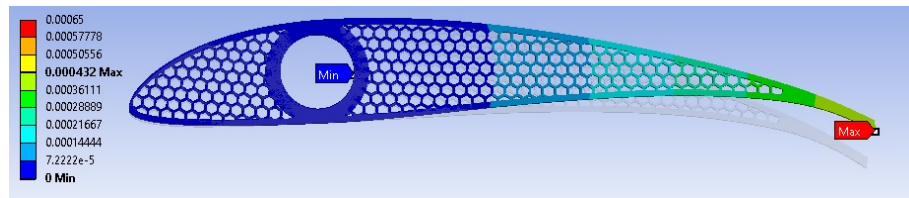


Figura 4.47: Deformação total para a nona topologia durante o segundo carregamento.

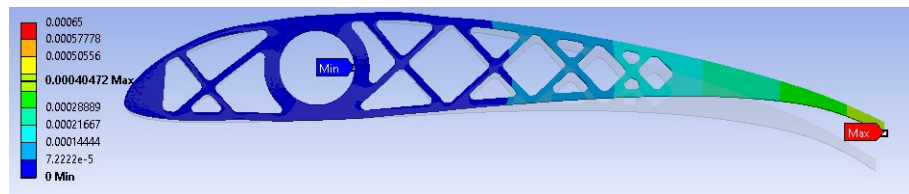


Figura 4.48: Deformação total para a décima topologia durante o segundo carregamento.



## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

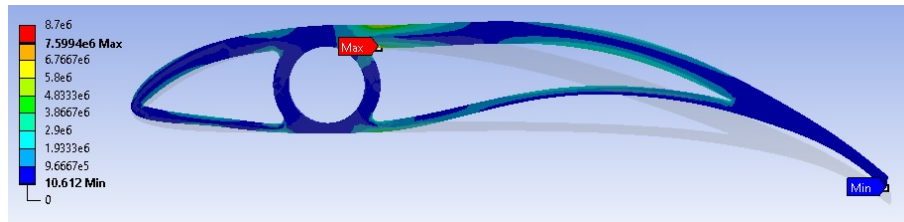


Figura 4.49: Tensão equivalente de von-Mises para a primeira topologia durante o segundo carregamento.

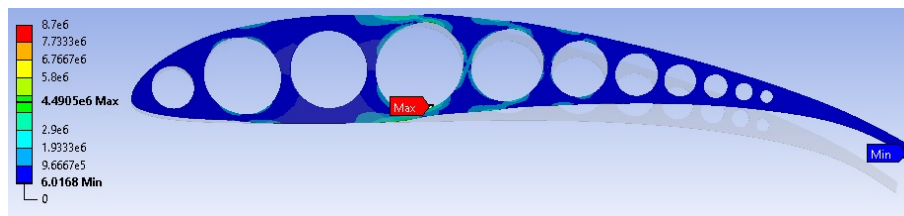


Figura 4.50: Tensão equivalente de von-Mises para a segunda topologia durante o segundo carregamento.

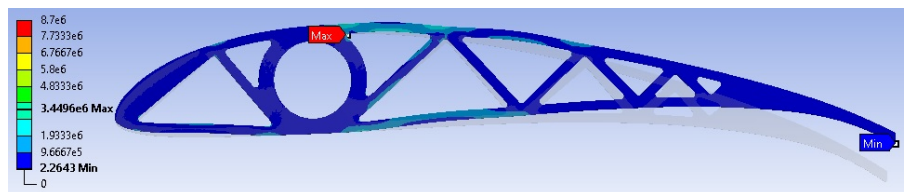


Figura 4.51: Tensão equivalente de von-Mises para a terceira topologia durante o segundo carregamento.

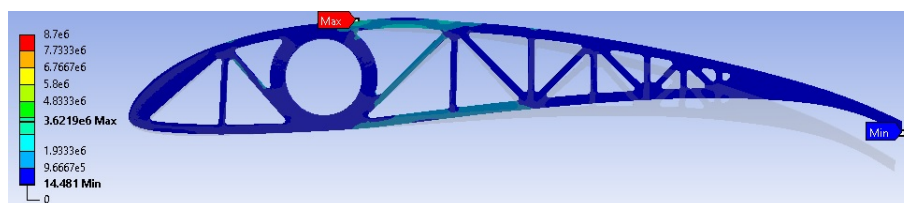


Figura 4.52: Tensão equivalente de von-Mises para a quarta topologia durante o segundo carregamento.

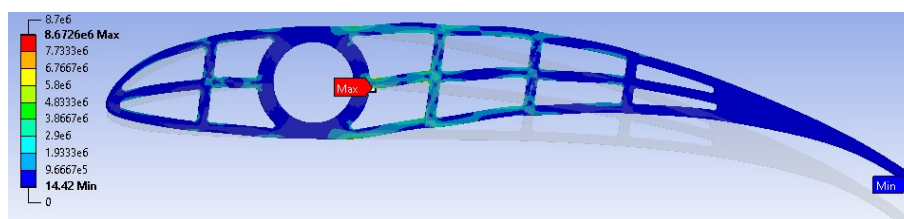


Figura 4.53: Tensão equivalente de von-Mises para a quinta topologia durante o segundo carregamento.

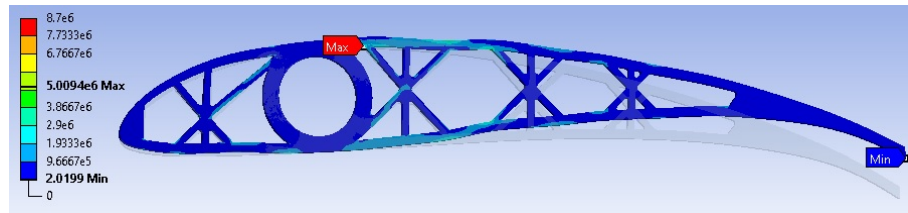


Figura 4.54: Tensão equivalente de von-Mises para a sexta topologia durante o segundo carregamento.

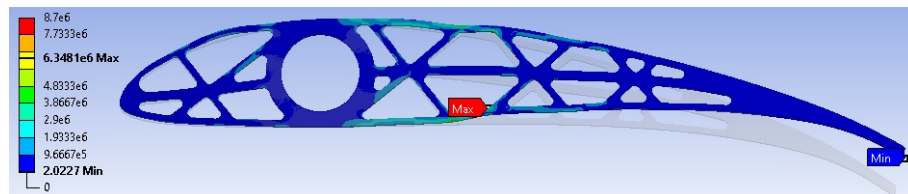


Figura 4.55: Tensão equivalente de von-Mises para a sétima topologia durante o segundo carregamento.

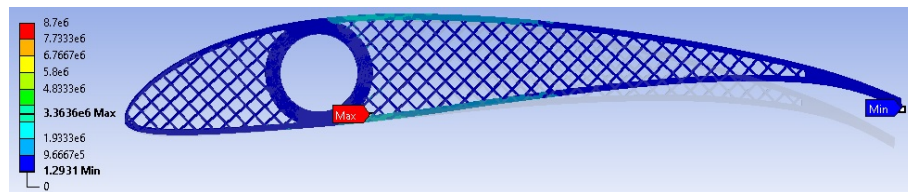


Figura 4.56: Tensão equivalente de von-Mises para a oitava topologia durante o segundo carregamento.

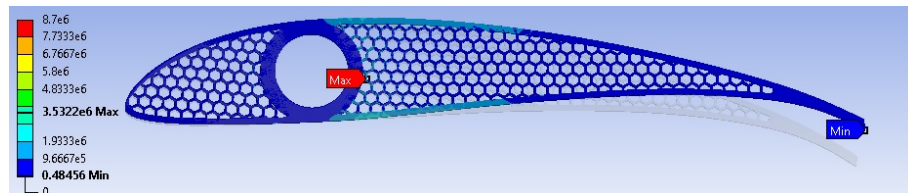


Figura 4.57: Tensão equivalente de von-Mises para a nona topologia durante o segundo carregamento.

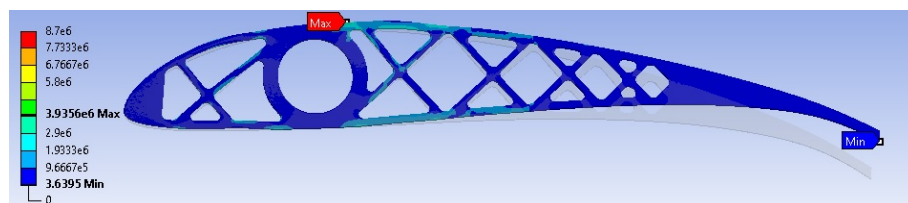


Figura 4.58: Tensão equivalente de von-Mises para a décima topologia durante o segundo carregamento.

#### 4.4.1 Primeiro Carregamento

Os resultados provenientes das simulações são apresentados no formato de imagem, sendo estabelecido o seguinte ordenamento: apresentação sequencial da deformação total da estrutura para cada uma das topologias analisadas (ver Figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 <sup>1</sup>) e seguidamente apresentação da tensão equivalente de von-Mises ao longo da estrutura para cada uma das topologias analisadas (ver Figuras 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 <sup>1</sup>). Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos a escala de cores utilizada mantém-se inalterada ou seja, a escala de cores é mantida constante. Para as imagens relativas à deformação a escala gerada varia entre um valor máximo de  $1.25mm$  e um valor mínimo de 0. No que concerne à tensão a escala gerada varia entre um valor máximo de  $7.6 MPa$  e um valor mínimo de 0. Por fim, realçar que as imagens geradas através de escala automática estão presentes no anexo A.

#### 4.4.2 Segundo Carregamento

A apresentação dos resultados provenientes da análise referente ao segundo carregamento seguem o formato utilizado na secção 4.4.1 ou seja, são apresentadas sequencialmente imagens da deformação total (ver Figuras 4.39, 4.40, 4.41, 4.42, 4.43, 4.44, 4.45, 4.46, 4.47, 4.48 <sup>1</sup>) e da tensão equivalente de von-Mises (ver Figuras 4.49, 4.50, 4.51, 4.52, 4.53, 4.54, 4.55, 4.56, 4.57, 4.58 <sup>1</sup>) para as dez topologias analisadas. Para as imagens relativas à deformação a escala gerada varia entre um valor máximo de  $0.65mm$  e um valor mínimo de 0. No que concerne à tensão a escala gerada varia entre um valor máximo de  $8.7 MPa$  e um valor mínimo de 0. Por fim, realçar que as imagens geradas através de escala automática estão presentes no anexo A.

### 4.5 Análise de resultados

Para avaliar qual a melhor topologia estrutural para a geometria da nervura foi necessário estabelecer um conjunto de critérios de resistência e rigidez que permitissem avaliar quantitativamente as diversas propostas. Para esse efeito foram considerados três parâmetros distintos tensão equivalente de von-Mises máxima, deformação total máxima e energia de deformação. Nas Tabelas 4.7 e 4.8 encontram-se condensados os valores para esses parâmetros para o primeiro e segundo carregamento respetivamente. Tal como explicado na secção 3.3 o primeiro carregamento analisado decorreu de uma simplificação, a qual teve como objetivo principal a possibilidade de validação do modelo numérico através de ensaios experimentais. A análise quantitativa com vista ao estabelecimento de uma disposição hierárquica das topologias propostas foi apenas efetuada para os resultados provenientes da análise associada ao segundo carregamento, dados referentes à Tabela 4.8. Devido à maior proximidade entre o carregamento utilizado durante o segundo conjunto de análises e as forças atuantes na nervura provenientes da sustentação foi possível gerar um ranking que avaliasse com rigor o desempenho das diversas topologias.

---

<sup>1</sup>Apesar de constarem numa secção diferente, as imagens encontram-se apresentadas em páginas anteriores devido a questões de visualização e comparação de resultados.



Tabela 4.7: Valores dos parâmetros de avaliação resultantes do primeiro conjunto de simulações efetuadas.

Topologia	Deformação máxima [mm]	Tensão máxima [MPa]	Energia Deformação [J]	Massa [g]
1	1,15	7,54	$1,19 \times 10^{-3}$	6,70
2	0,99	4,78	$9,46 \times 10^{-4}$	6,81
3	0,97	3,29	$9,16 \times 10^{-4}$	6,72
4	0,96	3,43	$9,10 \times 10^{-4}$	6,86
5	0,97	3,89	$9,68 \times 10^{-4}$	6,87
6	0,95	4,12	$9,09 \times 10^{-4}$	6,63
7	1,18	5,05	$1,15 \times 10^{-3}$	6,81
8	1,23	4,39	$1,18 \times 10^{-3}$	6,74
9	1,15	4,65	$1,12 \times 10^{-3}$	6,79
10	1,05	4,27	$1,00 \times 10^{-3}$	6,77

Tabela 4.8: Valores dos parâmetros de avaliação resultantes do segundo conjunto de simulações efetuadas.

Topologia	Deformação máxima [mm]	Tensão máxima [MPa]	Energia deformação [J]	Massa [g]
1	0,62	7,60	$1,09 \times 10^{-3}$	6,47
2	0,38	4,49	$4,01 \times 10^{-4}$	6,58
3	0,37	3,45	$3,03 \times 10^{-4}$	6,49
4	0,36	3,62	$2,96 \times 10^{-4}$	6,63
5	0,38	8,67	$6,73 \times 10^{-4}$	6,63
6	0,34	5,01	$3,59 \times 10^{-4}$	6,34
7	0,45	6,35	$4,18 \times 10^{-4}$	6,58
8	0,46	3,36	$3,01 \times 10^{-4}$	6,51
9	0,43	3,53	$3,26 \times 10^{-4}$	6,56
10	0,40	3,94	$3,28 \times 10^{-4}$	6,54

$$DE = 0,4 \times \frac{d}{d_{ref}} + 0,4 \times \frac{e}{e_{ref}} + 0,2 \times \frac{t}{t_{ref}} \quad (4.2)$$

Para classificar as diversas topologias foi criada uma equação designada por desempenho estrutural  $DE$  (ver equação 4.2) a qual recorre a uma ponderação dos parâmetros avaliados para obter um único valor que expresse o desempenho estrutural de cada topologia. A construção da função seguiu um procedimento sequencial que consistiu nos seguintes passos: separação de variáveis entre parâmetros avaliadores da rigidez e parâmetros avaliadores de resistência, escolha de fatores de ponderação para cada um dos parâmetros e seleção dos valores de referência. Seguindo os passos supraditos obtiveram-se as seguintes ilações: os parâmetros avaliadores da rigidez foram a deformação máxima  $d$  e a energia de deformação  $e$ , enquanto os parâmetros avaliadores da resistência foram a tensão equivalente máxima  $t$ ; tendo em conta os resultados sumariados na Tabela 4.8 foi atribuída uma ponderação de 80% para os parâmetros de rigidez, equitativamente distribuídos, e uma ponderação de 20% para o parâmetro de resistência; os valores de referência escolhidos foram os valores máximos obtidos para cada um dos parâmetros avaliados  $d_{ref}, e_{ref}, t_{ref}$ . A escolha das percentagens para cada parâmetro resultou de uma avaliação das tendências dos resultados obtidos, ou seja, verificou-se que os valores da tensão máxima equivalente encontravam-se longe dos valores de rutura, logo foi atribuída uma ponderação inferior a este parâmetro comparativamente aos parâmetros avaliadores da rigidez. Para estes, a ponderação remanescente foi dividida de igual forma uma vez que é desejável evitar

tanto uma deformação concentrada elevada, representada pelo valor da deformação máxima, como uma deformação global excessiva, representada pela energia de deformação. Na escolha dos valores de referência optou-se pelos valores mais altos de cada um dos parâmetros avaliados de modo a que fosse possível obter uma escala comparativa entre as diversas topologias para cada um dos parâmetros avaliados. O resultado final foi dado então pela soma das multiplicações das ponderações pelo resultado da fração entre os valores dos parâmetros obtidos e os respetivos valores de referência. Seguindo um raciocínio lógico quanto menor fosse o valor obtido pela função mais promissor seria o desempenho estrutural da topologia analisada. Os resultados da aplicação desta função a cada uma das topologias propostas foram concentrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Resultados da aplicação da equação  $DE$  às topologias analisados.

Topologia	Resultado da função $DE$
1	0,98
2	0,50
3	0,43
4	0,42
5	0,69
6	0,47
7	0,59
8	0,48
9	0,48
10	0,47

Dado que, existe uma grande semelhança nos resultados obtidos entre algumas das topologias analisadas foi decidido incorporar a massa como parâmetro adicional de avaliação. Embora as topologias fossem concebidas para apresentarem massas semelhantes as pequenas diferenças de massa registadas são equiparadas em percentagem às diferenças existentes entre os parâmetros avaliadores de resistência e rigidez. Foi então gerada uma nova função designada por desempenho final  $DF$  (ver equação 4.3) a qual é apenas composta pela multiplicação da massa pelo valor obtido pela equação 4.2.

$$DF = \text{Massa} \times DE \quad (4.3)$$

Esta construção da função foi estabelecida de modo a manter o critério entre funções, ou seja, o valor mais baixo é aquele que representa a topologia com o melhor desempenho. Logo a única operação que permite manter esse objetivo é a multiplicação. Os resultados obtidos assim como o ranking final estão sumariados na Tabela 4.10.

Analisando os dados decorrentes da Tabela 4.10 verifica-se que as terceira e quarta topologias são aquelas que apresentam um desempenho melhor, uma vez que os respetivos resultados provenientes da aplicação da função  $DF$  representam os valores mínimos obtidos. Logo pode concluir-se que as configurações em treliça são aquelas que exibem um melhor desempenho para o carregamento em análise.

Tabela 4.10: Resultados da aplicação da equação  $DF$  às topologias analisadas.

Topologia	Resultado da função $DF$	Ranking
1	6,31	10
2	3,26	7
3	2,79	1
4	2,81	2
5	4,59	9
6	2,96	3
7	3,88	8
8	3,16	6
9	3,14	5
10	3,07	4

As estruturas em padrão, favo de mel e losango, oitava e nona topologias, respetivamente, apresentaram resultados ligeiramente abaixo daquilo que seria expectável, uma vez que poderia pensar-se que nervuras com uma distribuição de massa uniforme e detalhada podem-se distribuir os esforços de forma mais eficiente e consequentemente obter um desempenho superior. Por fim, as topologias que apresentam piores resultados são aquelas em que a ausência de conexão entre as partes superior e inferior da nervura se prolonga por áreas de tamanho considerável, ou seja são aquelas em que os esforços não são transmitidos de forma eficiente entre as linhas do extradorso e intradorso devido a inexistência de elementos de ligação. Este facto degenera numa solitação à flexão das mesas da nervura afetando negativamente a integridade estrutural. Este tipo de solitação induz deformações acentuadas na topologia da nervura aumentando assim consideravelmente o resultado da função objetivo.



# Capítulo 5

## Otimização Topológica

### 5.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é proceder à otimização estrutural da topologia da nervura com recurso ao modelo de otimização topológica incorporado no software Ansys Workbench. A organização das análises efetuadas segue o encadeamento utilizado no capítulo 4, ou seja, as otimizações implementadas encontram-se diferenciadas consoante com o carregamento analisado. Dentro de cada um dos carregamentos são formalizadas duas otimizações distintas. A primeira otimização tem como objetivo obter uma distribuição geométrica com massa semelhante às nervuras previamente analisadas, cuja deformação máxima fosse equiparada aos resultados obtidos nas análises numéricas efetuadas no capítulo 4 e a tensão máxima apresentasse um fator de segurança mínimo de 2. A segunda otimização tem como objetivo averiguar se é possível diminuir a massa total da nervura estabelecendo como limites de rigidez e resistência os melhores resultados provenientes das nervuras analisadas no capítulo 4, ou seja, os valores máximos para a deformação e para a tensão fossem os respetivos valores mínimos obtidos nas análises numéricas às topologias previamente testadas. A finalidade deste estudo é averiguar quais as geometrias resultantes dos inputs introduzidos assim como a sua complexidade, uma vez que a topologia mais eficiente pode apresentar uma configuração não trivial. Os benefícios das otimizações referentes ao primeiro carregamento são posteriormente validados através da confrontação com os resultados experimentais, (ver capítulo 7). No que diz respeito aos resultados obtidos para o segundo carregamento, estes são sujeitos a uma análise quantitativa através da aplicação das equações 4.2 e 4.3.

### 5.2 Formulação matemática

O princípio da otimização topológica formalizada pelo software Ansys é maximizar a rigidez estrutural atendendo às restrições de volume. O módulo de otimização topológica deste software converte o problema de otimização de topológica num problema de optimização de forma tendo como base o algoritmo associado à estratégia SIMP. O objetivo é procurar a rigidez máxima e o volume mínimo sob certas restrições, com a função de distribuição de material como parâmetro de otimização. Esta função objetivo reduz a energia de deformação na condição de cumprir com as restrições estruturais impostas. A redução da energia de deformação significa um aumento da rigidez da estrutura [69]. O algoritmo incorporado engloba um parâmetro designado por pseudo-densidade  $\eta_i$  que indica a densidade de cada elemento finito. Este parâmetro assume valores entre 0 e 1, em que 0 indica a remoção de material e 1 a preservação do mesmo. O volume total é dado pela soma dos volumes de todos os elementos (ver equação 5.1).

$$V = \sum_i \eta_i V_i \quad (5.1)$$

A pseudo-densidade afeta o tensor de elasticidade para cada elemento através da equação 5.2

$$[E_i] = [E(\eta_i)] \quad (5.2)$$

Na equação elástica convencional, o tensor elástico encontra-se relacionado com o vetor das tensões  $\sigma_i$  e das deformações  $\varepsilon_i$  da seguinte forma (ver equação 5.3).

$$[\sigma_i] = [E_i][\varepsilon_i] \quad (5.3)$$

O algoritmo final que procurar maximizar a rigidez através da minimização da energia de deformação é dado pela equação 5.4.

$$\begin{aligned} u_c &= \min(\eta_i) \\ s.t. \int_{\Omega} \eta_i d\Omega &\leq aV_2 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Na equação 5.4  $u_c$  é a conformidade, representativa do cumprimento do valor mínimo da função,  $\eta_i$  é a pseudo-densidade,  $a$  é o rácio de redução de volume e  $V_2$  é o volume antes da otimização da estrutura.

Quando a estrutura recebe novas condições de carregamento, a máxima rigidez pode ser expressa pela equação 5.5.

$$F(U_C^1, U_C^2, \dots, U_C^n) = \sum_{i=1}^n W_i U_C^i, W_i \geq 0 \quad (5.5)$$

Na equação  $U_C$  é a conformidade com o cumprimento da minimização da função objetivo nas condições de carregamento  $i$  e  $W_i$  é a componente das condições de carregamento sob a energia de deformação mínima.

### 5.3 Descrição do processo

O processo de otimização topológica começa com o desenho da peça compacta, ou seja, o componente a otimizar é projetado como um corpo completamente sólido. De seguida, são aplicadas as condições de fronteira pretendidas assim como o carregamento ao qual o componente estará sujeito. Geralmente o componente é dividido em duas zonas distintas, sendo estas designadas por *design region* e *exclusion region*. A região designada como *design region* representa a parte do componente que pode ser modificada e reduzida ou seja, a região do corpo sobre o qual recai o processo de otimização. Por outro lado, a *exclusion region* representa a região do corpo que não pode sofrer qualquer tipo de alteração, estando esta normalmente associada a zonas onde são aplicadas as condições de fronteira e o carregamento. O passo seguinte consiste em indicar quais os objetivos e restrições pretendidas, nomeadamente qual a percentagem de massa que se pretende ver reduzida e quais os limites em termos de tensões e deformações admissíveis para a topologia em questão. O resultado proveniente da otimização topológica apresenta por norma uma estrutura complexa sem qualquer tipo de padrão definido sendo por isso necessário

fazer um refinamento da solução de modo a obter um componente final que seja manufaturável e funcional. Concluída esta fase pode-se então proceder aos testes do produto final e verificar se este efetivamente cumpre com os requisitos utilizados para a otimização. Todo este processo encontra-se sumarizado na Figura 5.1.

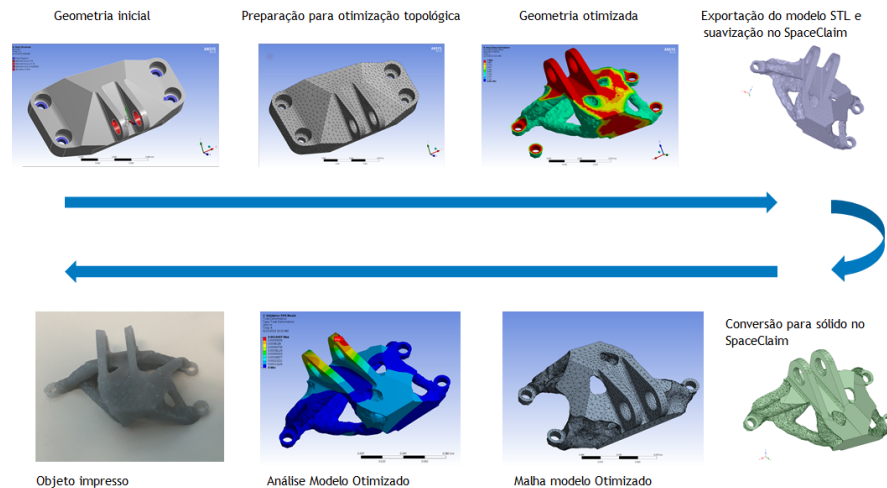


Figura 5.1: Descrição do processo de otimização topológica, adaptado de [70].

## 5.4 Análises efetuadas

À semelhança das análises numéricas efetuadas também o processo de otimização topológica foi dividido em duas etapas distintas, ou seja, as análises foram divididas de acordo com o carregamento presente na nervura. Numa primeira análise foram efetuados estudos com base nos carregamentos pontuais deduzidos na secção 3.3. Numa segunda análise foram efetuadas análises com base nos carregamentos distribuídos associadas à distribuição da força de sustentação ao longo da nervura de acordo com o indicado na secção 3.3.

### 5.4.1 Primeiro Carregamento

Tal como supradito, a primeira fase do processo de otimização topológica teve como objetivo proceder à otimização do espaço da nervura quando esta se encontra sujeita ao carregamento composto por duas cargas pontuais cuja magnitude foi calculada na secção 3.3 Seguindo a metodologia representada pela Figura 5.1, a primeira fase deste processo consistiu no desenho da nervura compacta (ver Figura 5.2). No entanto, é importante realçar que o furo para o posicionamento da longarina tem de estar já presente dado que a aplicação posterior das condições de fronteira é um factor preponderante para o desenrolar do processo de otimização.

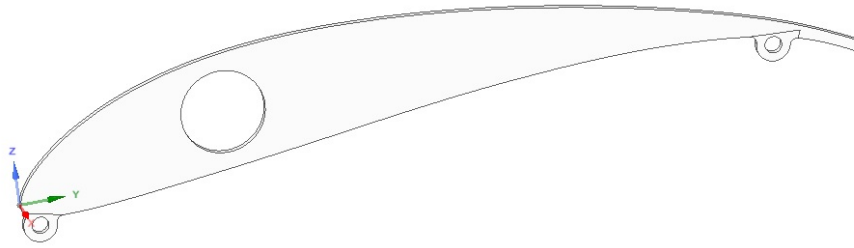


Figura 5.2: Topologia de nervura utilizada para o primeiro conjunto de otimizações topológicas.

De seguida, foram inseridas as cargas e as condições de fronteiras associadas a esta análise, sendo estas semelhantes às descritas no capítulo 4. A descrição dos espaços de *design region* e *exclusion region* estão presentes na imagem 5.3. A *exclusion region* é composta pela zona onde se encontra aplicada a condição de fronteira de encastramento associada ao posicionamento da longarina, pela zona de aplicação das cargas assim como a sua respetiva área circundante e pelos contornos superiores e inferiores da nervura. Este último ponto é de extrema importância, uma vez que o perfil não deverá sofrer alterações nas linhas representativas do extradorso e intradorso de forma a não comprometer o desempenho aerodinâmico do perfil. Dentro deste primeiro conjunto de otimizações foram criadas duas análises com objetivos distintos.

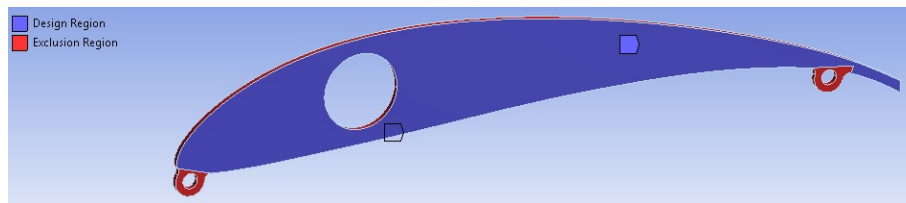


Figura 5.3: *Design region* e *exclusion region* utilizadas no primeiro conjunto de otimizações topológicas.

Numa primeira análise definiram-se como metas da otimização uma deformação máxima no bordo de fuga de  $1\text{ mm}$ , uma tensão máxima admissível de 50% da tensão de rutura do material e uma percentagem de massa a reter de 40% (ver Figura 5.4). Numa segunda análise definiram-se como metas da otimização uma deformação máxima na ponta de  $0,8\text{ mm}$ , uma tensão máxima admissível de  $3,3\text{ MPa}$  e uma percentagem de massa a reter de 25%. Nesta segunda análise as diferenças relativamente à Figura 5.4 são a percentagem de massa a reter e a tensão máxima de von-Mises.

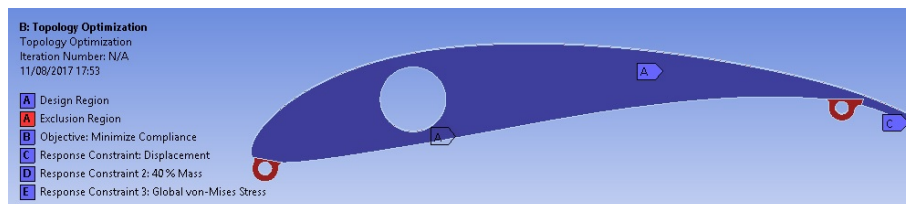


Figura 5.4: Metas definidas para a primeira otimização topológica do conjunto inicial.

## 5.4.2 Segundo Carregamento

A segunda fase do processo de otimização topológica tem como objetivo proceder à otimização do espaço da nervura quando esta se encontra solicitada com um carregamento composto por duas cargas distribuídas uma aplicada no intradorso e outro no extradorso, de acordo com dedução efetuada na secção 3.3. Seguindo a mesma metodologia, a primeira fase deste processo



consistiu no desenho da nervura compacta (ver Figura 5.5), sendo que a única diferença a registar em relação à topologia da Figura 5.2 é a ausência das zonas onde se encontravam aplicadas as cargas pontuais.

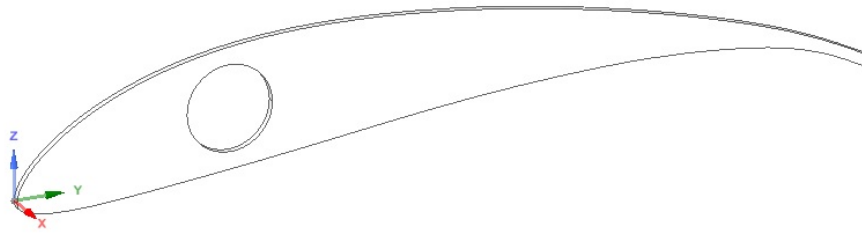


Figura 5.5: Topologia de nervura utilizado para o segundo conjunto de otimizações topológicas.

De seguida, foram inseridas as cargas e as condições de fronteira associadas a esta análise, sendo estas semelhantes às descritas no capítulo 4. A descrição das zonas de *design region* e *exclusion region* estão presentes na Figura 5.6. Comparando novamente com a primeira análise efetuada a única diferença a assinalar é novamente a ausência da zona onde se encontravam aplicadas as cargas pontuais.

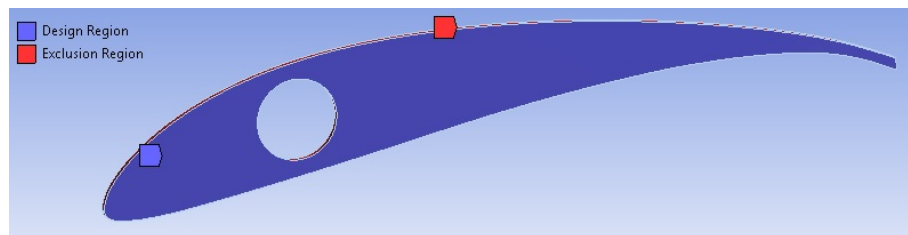


Figura 5.6: *Design region* e *exclusion region* utilizadas no segundo conjunto de otimizações topológicas.

À semelhança do ocorrido anteriormente, foram criadas duas análises com objetivos distintos. Numa primeira análise definiram-se como metas da otimização uma deformação máxima de  $0,3\text{ mm}$ , uma tensão máxima admissível de 50% da tensão de rutura do material e uma percentagem de massa a reter de 40% (ver Figura 5.7). Devido à natureza do carregamento, contrapondo com o que aconteceu com o primeiro carregamento, a limitação da deformação máxima foi efetuada em vários pontos e não só na ponta de modo a obter uma solução mais precisa e concordante com os objetivos estabelecidos. Numa segunda análise definiram-se como metas da otimização uma deformação máxima de  $0,3\text{ mm}$ , uma tensão máxima admissível de  $3,3\text{ MPa}$  e uma percentagem de massa a reter de 30%. Nesta segunda análise as diferenças relativamente à Figura 5.7 são a percentagem de massa a reter e a tensão máxima de von-Mises.

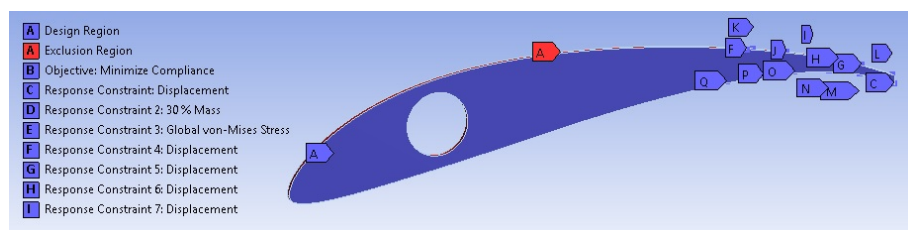


Figura 5.7: Metas definidas para a primeira otimização topológica do segundo conjunto.

## 5.5 Resultados da otimização

À semelhança do decorrido anteriormente, os resultados da otimização topológica serão mostrados separadamente consoante o carregamento presente na nervura.

### 5.5.1 Primeiro Carregamento

Nas Figuras 5.8 e 5.9 estão representadas as distribuições de massa correspondentes aos processos de otimização descritos na secção 5.4.1. Na Figura 5.8 temos representado o resultado obtido para a primeira análise do primeiro conjunto de otimizações através do qual se pretendia obter uma geometria com pesa equiparada às topologias previamente propostas que cumprisse com os requisitos de resistência e rigidez previamente estabelecidos. Verifica-se que existe uma grande redução de massa a montante da posição da longarina, sendo o *offset* em relação às linhas do extradorso e intradorso bastante mais baixo do que verificado a jusante da longarina. Constata-se ainda que nesta zona existem apenas duas barras inclinadas que ligam a parte superior à parte inferior da nervura. A jusante da posição da longarina existe uma maior concentração de massa, sendo a sua distribuição semelhante entre a zona superior e inferior da nervura. Nota ainda para a presença de duas barras inclinadas, perfeitamente identificáveis, a ligar as duas zonas e ainda uma terceira barra com uma densidade inferior.

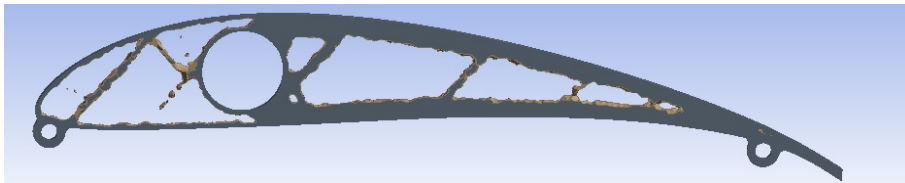


Figura 5.8: Resultado da otimização para a primeira análise do primeiro conjunto.

Na Figura 5.9 temos representado o resultado obtido para a segunda análise do primeiro conjunto de otimizações através do qual se pretendia obter uma redução da massa da nervura em relação às topologias anteriores, estabelecendo como limites máximos de rigidez e resistência os resultados mais promissores das topologias anteriores. Verifica-se que existem apenas ligeiras diferenças entre este resultado e o anterior. A montante da posição da longarina existe a presença de mais uma barra sendo por isso a ligação entre a zona superior e inferior da nervura feita por três barras. A jusante da posição da longarina verifica-se uma redução de concentração de massa junto às linhas do extradorso e intradorso.

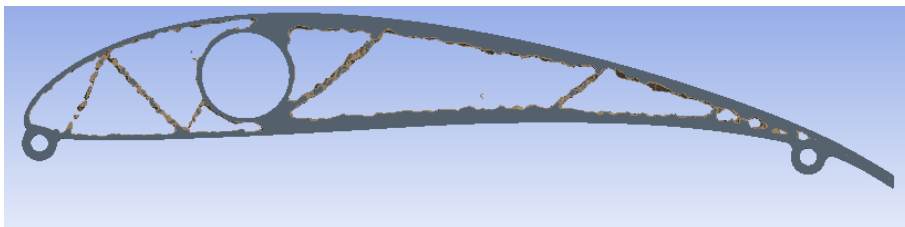


Figura 5.9: Resultado da otimização para a segunda análise do primeiro conjunto.

### 5.5.2 Segundo Carregamento

Nas Figuras 5.10 5.11 estão representadas as distribuições de massa correspondentes aos processos de otimização descritos na secção 5.4.2. Na Figura 5.10 temos representado o resultado obtido para a primeira análise do segundo conjunto de otimizações através do qual se pretendia obter uma geometria com massa equiparada às topologias inicialmente propostas que cumprisse com os requisitos de resistência e rigidez previamente estabelecidos. Verifica-se que existe uma maior redução de massa na região a montante da posição da longarina. Na zona a jusante existe uma maior concentração de massa, no entanto não se identifica claramente nenhum padrão. Existem na proximidade da posição da longarina, nomeadamente a jusante, uma grande diversidade de zonas com diferentes níveis de densidade o que torna difícil a identificação de figuras geométricas para posterior refinamento da solução. A montante da posição da longarina, este mesmo processo encontra-se mais facilitado uma vez que são identificáveis várias barras que ligam as partes superior e inferior da nervura.

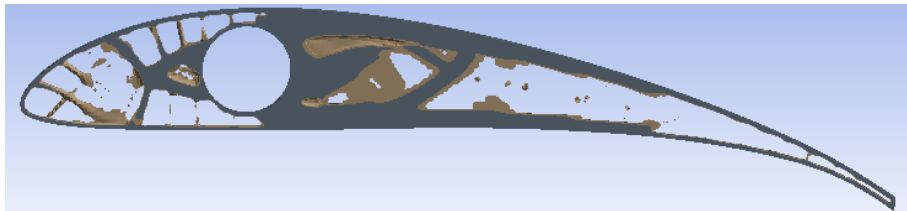


Figura 5.10: Resultado da otimização para a primeira análise do segundo conjunto.

Na Figura 5.11 temos representado o resultado obtido para a segunda análise do segundo conjunto de otimizações através do qual se pretendia obter uma redução de massa da nervura em relação às topologias anteriores, estabelecendo como limites máximos de rigidez e resistência os resultados mais promissores das topologias anteriores. Este resultado representa a geometria mais complexa de todas as configurações obtidas com recurso ao processo de otimização topológica. Verifica-se que a maior concentração de massa está a jusante da posição da longarina, identificando-se nesta zona um conjunto de barras semelhantes, cuja inclinação vai variando, que efetuam a ligação entre as zonas superior e inferior da nervura. A montante da posição da longarina existe igualmente um conjunto de barras que desempenham a mesma função. No entanto, ao contrário do que acontece a jusante, estas não exibem um padrão facilmente identificável.

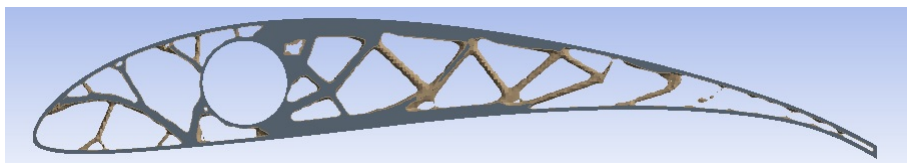


Figura 5.11: Resultado da otimização para a segunda análise do segundo conjunto.

## 5.6 Análise e validação dos resultados

Nesta secção pretende-se apresentar as geometrias resultantes da refinação dos resultados obtidos pela otimização topológica e sua posterior análise, de forma a verificar se estas cumprem com os objetivos pretendidos aquando da realização do processo de otimização. Neste ponto é importante referir que este processo representa um método iterativo, uma vez que durante o

refinamento da proposta obtida pelo processo de otimização topológica foi necessário efetuar um conjunto de modificações até atingir o desempenho desejado em termos de rigidez e resistência. Geralmente, o tipo de modificações efetuadas estavam relacionadas com pequenas concentrações de tensões existentes em algumas arestas. De seguida são apresentados os resultados finais deste processo iterativo. Tal como descrito anteriormente, as conclusões serão apresentadas separadamente de acordo com o carregamento imposto. Por fim é importante referir que o estudo de convergência de malha para as topologias analisadas seguiu o procedimento descrito na seção 4.3.

### 5.6.1 Primeiro Carregamento

Nas Figuras 5.12 e 5.13 temos representados os resultados do refinamento da proposta de otimização presentes nas Figuras 5.8 e 5.9.

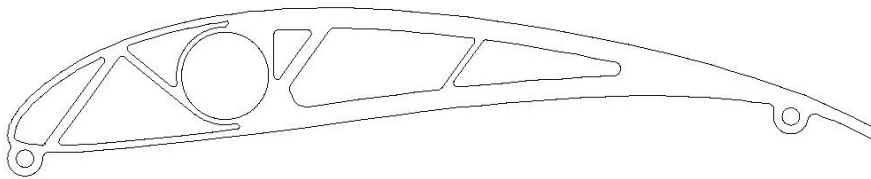


Figura 5.12: Resultado da refinação da primeira proposta de otimização do primeiro conjunto de estudos efetuados.

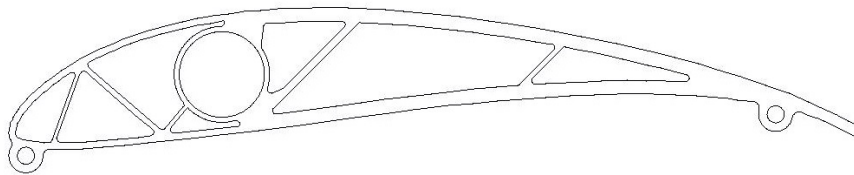


Figura 5.13: Resultado da refinação da segunda proposta de otimização do primeiro conjunto de estudos efetuados.

Analisando estas geometrias de acordo com o carregamento presente neste primeiro conjunto de análises, verifica-se que os valores de deformação máxima, tensão máxima e massa encontram-se dentro dos objetivos descritos na seção 5.4.1. Os resultados presentes nas imagens 5.14 e 5.15 são referentes à geometria obtida através do primeiro processo de otimização do primeiro conjunto. Por outro lado, as imagens 5.16 e 5.17 correspondem àquela obtida pelo segundo processo de otimização do primeiro conjunto. Para as imagens relativas à deformação a escala gerada varia entre um valor máximo de  $1.25\text{mm}$  e um valor mínimo de 0. No que concerne à tensão a escala gerada varia entre um valor máximo de  $7.6\text{MPa}$  e um valor mínimo de 0. Por fim, realçar que as imagens geradas através de escala automática estão presentes no anexo A.

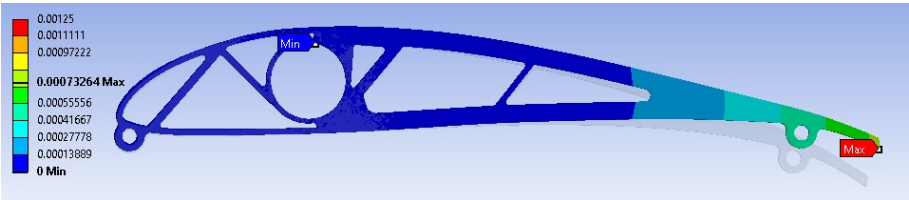


Figura 5.14: Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da primeira otimização do primeiro conjunto de análises.

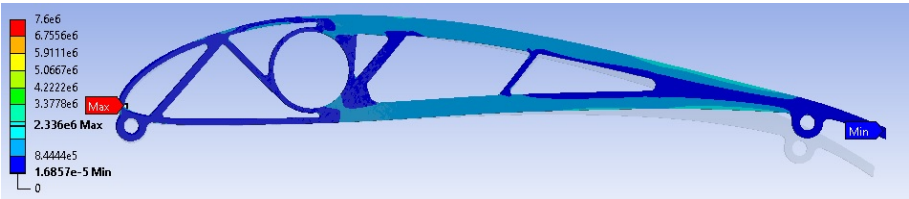


Figura 5.15: Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da primeira otimização do primeiro conjunto de análises.

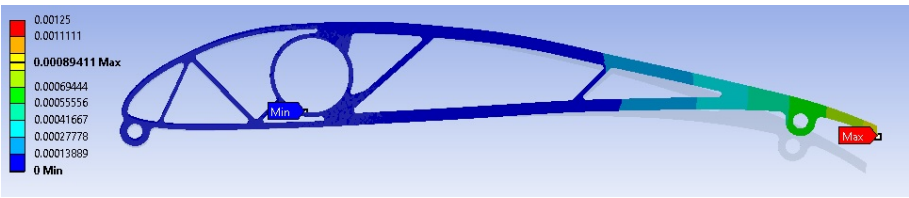


Figura 5.16: Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da segunda otimização do primeiro conjunto de análises.

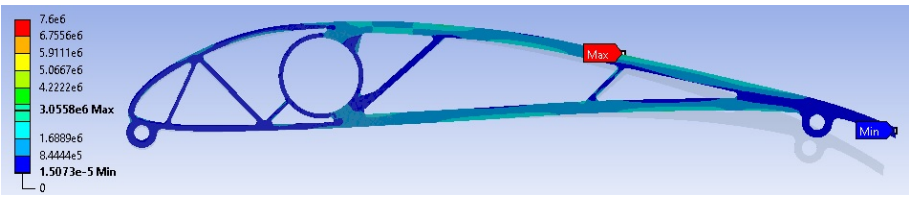


Figura 5.17: Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da segunda otimização do primeiro conjunto de análises.

Todos os parâmetros relevantes para a análise do desempenho estrutural das geometrias obtidas encontram-se condensados nas Tabelas 5.1 e 5.2 respetivamente.

Tabela 5.1: Resultados da análise da geometria proveniente da primeira optimização do primeiro conjunto.

Parâmetro	Valor
Nº elementos	2848
Percentagem de elementos com qualidade superior a 0.75	0,93
Peso [g]	6,77
Deformação máxima [mm]	0,73
Tensão máxima equivalente [Mpa]	2,34
Energia de deformação [J]	$6,77 \times 10^{-4}$

Tabela 5.2: Resultados da análise da geometria proveniente da segunda otimização do primeiro conjunto.

Parâmetro	Valor
hline Nº elementos	2286
Percentagem de elementos com qualidade superior a 0.75	0,93
Peso [g]	5,31
Deformação máxima [mm]	0,89
Tensão máxima equivalente [Mpa]	3,06
Energia de deformação [J]	$8,41 \times 10^{-4}$

A validação destes resultados será posteriormente discutida aquando da apresentação dos resultados obtidos durante os ensaios experimentais.

### 5.6.2 Segundo Carregamento

Nas Figuras 5.18 e 5.19 temos representados os resultados do refinamento da proposta de otimização presentes nas Figuras 5.10 e 5.11.

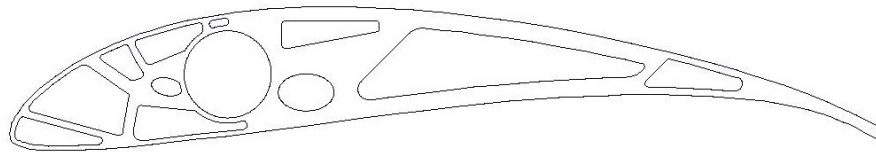


Figura 5.18: Resultado da refinação da primeira proposta de otimização do segundo conjunto de estudos efetuados.

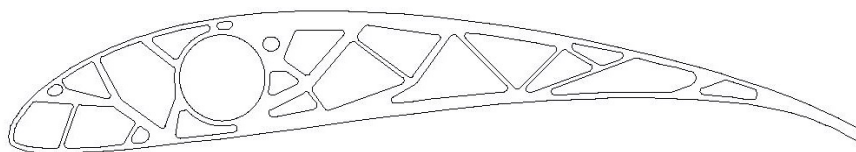


Figura 5.19: Resultado da refinação da segunda proposta de otimização do segundo conjunto de estudos efetuados.

Analisando estas geometrias de acordo com o carregamento presente neste segundo conjunto de análises, verifica-se que os valores de deformação máxima, tensão máxima e massa encontram-se dentro dos objetivos descritos na secção 5.4.2. Os resultados presentes nas Figuras 5.20 e 5.21 são referentes à geometria obtida através do primeiro processo de otimização do segundo conjunto. Por outro lado, as Figuras 5.22 e 5.23 correspondem àquela obtida pelo segundo processo de otimização do segundo conjunto. Para as imagens relativas à deformação a escala gerada varia entre um valor máximo de  $0.65\text{mm}$  e um valor mínimo de 0. No que concerne à tensão a escala gerada varia entre um valor máximo de  $8.7\text{MPa}$  e um valor mínimo de 0. Por fim, realçar que as imagens geradas através de escala automática estão presentes no anexo A.

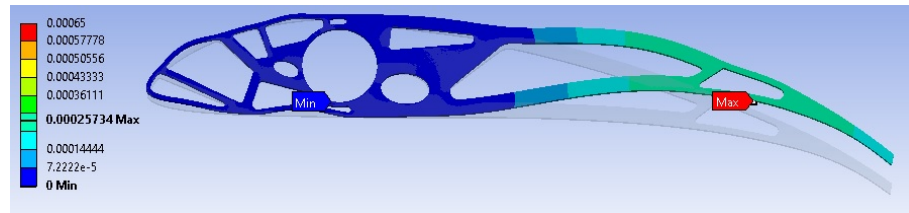


Figura 5.20: Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da primeira otimização do segundo conjunto de análises.

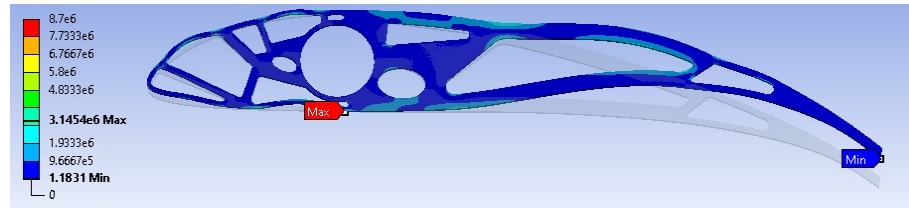


Figura 5.21: Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da primeira otimização do segundo conjunto de análises.

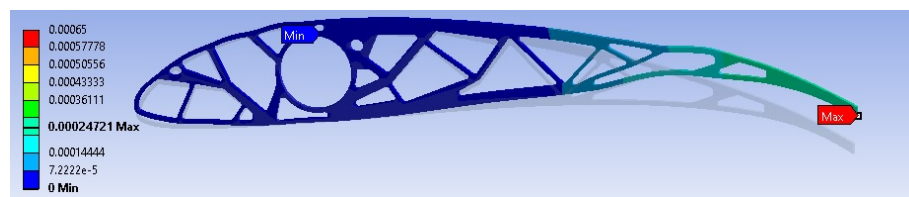


Figura 5.22: Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da segunda otimização do segundo conjunto de análises.

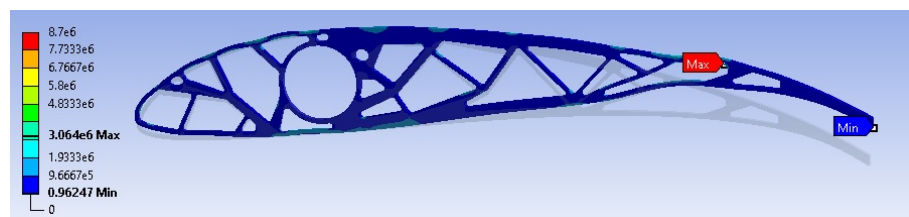


Figura 5.23: Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da segunda otimização do segundo conjunto de análises.

Todos os parâmetros relevantes para a análise do desempenho estrutural das geometrias obtidas encontram-se condensados nas Tabelas 5.3 e 5.4 respetivamente.

Tabela 5.3: Resultados da análise da geometria proveniente da primeira otimização do segundo conjunto.

Parâmetro	Valor
Nº elementos	6064
Percentagem de elementos com qualidade superior a 0.75	0,98
Peso [g]	6,58
Deformação máxima [mm]	0,26
Tensão máxima equivalente [Mpa]	3,15
Energia de deformação [J]	$3,68 \times 10^{-4}$

Tabela 5.4: Resultados da análise da geometria proveniente da segunda otimização do segundo conjunto.

Parâmetro	Valor
Nº elementos	5376
Percentagem de elementos com qualidade superior a 0.75	0,92
Peso [g]	5,51
Deformação máxima [mm]	0,25
Tensão máxima equivalente [Mpa]	3,06
Energia de deformação [J]	$2,45 \times 10^{-4}$

Por forma a avaliar quantitativamente a qualidade das soluções geradas pela otimização topológica foram aplicadas as equações 4.2 e 4.3 aos resultados expressos nas Tabelas 5.3 e 5.4. Os resultados provenientes destes cálculos estão expressos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Avaliação quantitativa das soluções geradas pelo processo de otimização topológica.

Topologia	DE	DF
Primeira otimização do segundo conjunto	0,38	2,47
Segunda otimização do segundo conjunto	0,32	1,77

Comparando os resultados registados na Tabela 5.5 e aqueles obtidos nas Tabelas 4.9 e 4.10 verifica-se que existe coerência entre ambos. Tal como esperado, as topologias resultantes do processo de otimização topológica apresentam um melhor desempenho estrutural em comparação com as topologias inicialmente propostos, dado que os valores obtidos pela aplicação das funções avaliadoras do desempenho estrutural são menores. Estes resultados vêm validar as soluções geradas pela otimização topológica, uma vez que as soluções propostas pelo software de análise, através da imposição de determinados objetivos e restrições, cumprem com a principal meta inerente a este processo, ou seja, melhoria da eficiência estrutural da nervura.



# Capítulo 6

## Estudo experimental

### 6.1 Introdução

A análise experimental teve como principal objetivo efetuar a validação dos resultados obtidos quer nos ensaios numéricos para o primeiro carregamento, secção 4.4.1, quer do primeiro conjunto de otimizações topológicas efetuadas, secção 5.6.1. Com esta análise pretendeu-se verificar se a topologia identificada pela análise experimental como a mais indicada é aquela que na realidade obtém o melhor desempenho. A análise experimental foi efetuada em duas fases distintas, uma delas relacionada com testes de rigidez e outro com testes de resistência. Para avaliar a rigidez foram efetuados ensaios experimentais onde se pretendia medir a deformação máxima da estrutura quando esta se encontrava solicitada com o carregamento correspondentes às simulações numéricas efetuadas primeiramente. Por outro lado, a avaliação da resistência foi efetuada através de ensaios de rutura, tendo estes dois objetivos distintos: verificar se as topologias em que foram identificadas tensões máximas superiores são aquelas que efetivamente falham primeiramente; avaliar se as zonas identificadas pelo modelo numérico como aquelas onde existem tensões mais elevadas são aquelas onde efetivamente as nervuras falham.

### 6.2 Impressora e suas propriedades

As propriedades utilizadas durante a impressão afetam as propriedades mecânicas dos componentes obtidos. Especificações como a temperatura de extrusão e a velocidade de impressão podem ter alguma influência nas propriedades das peças obtidas. Por forma a evitar que estes parâmetros influenciem os resultados obtidos, as propriedades de impressão foram mantidas constantes (ver Tabela 6.1). O programa utilizado para gerar o código de impressão foi o Cura 15.04.6. O trabalho de softwares deste tipo são transformar os ficheiros tipo stl, feitos através de programas CAD, em ficheiros do tipo gcode, que contêm informação quanto aos parâmetros de impressão escolhidos.

Tabela 6.1: Valores dos parâmetros de impressão utilizados.

Parâmetro de impressão	Valor
Espessura da camada [mm]	0,2
Diâmetro do extrusor [mm]	0,4
Temperatura extrusão [°C]	210
Temperatura da base de impressão [°C]	65
Velocidade de impressão [m/s]	40

Além dos parâmetros expostos na Tabela 6.1 foram adicionalmente definidos outros parâmetros cuja relevância para as propriedades mecânicas dos componentes obtidos é menor tais como, velocidade para a retração e velocidade de viagem dos extrusores (entre as várias coordenadas numa impressão). Um dos parâmetros mais investigados no que concerne à sua influência nas propriedades mecânicas obtidas através do processo de FDM é a orientação da camada. No

entanto, a sua manipulação requer alterações no código gerado para a impressão, âmbito este que não se enquadra nos objetivos desta dissertação. Logo, a orientação de impressão utilizada foi a pré-definida pelo software, sendo esta  $\pm 45^\circ$ .

Na Figura 6.1 está representada a impressora utilizada para fabricar as várias topologias analisadas.

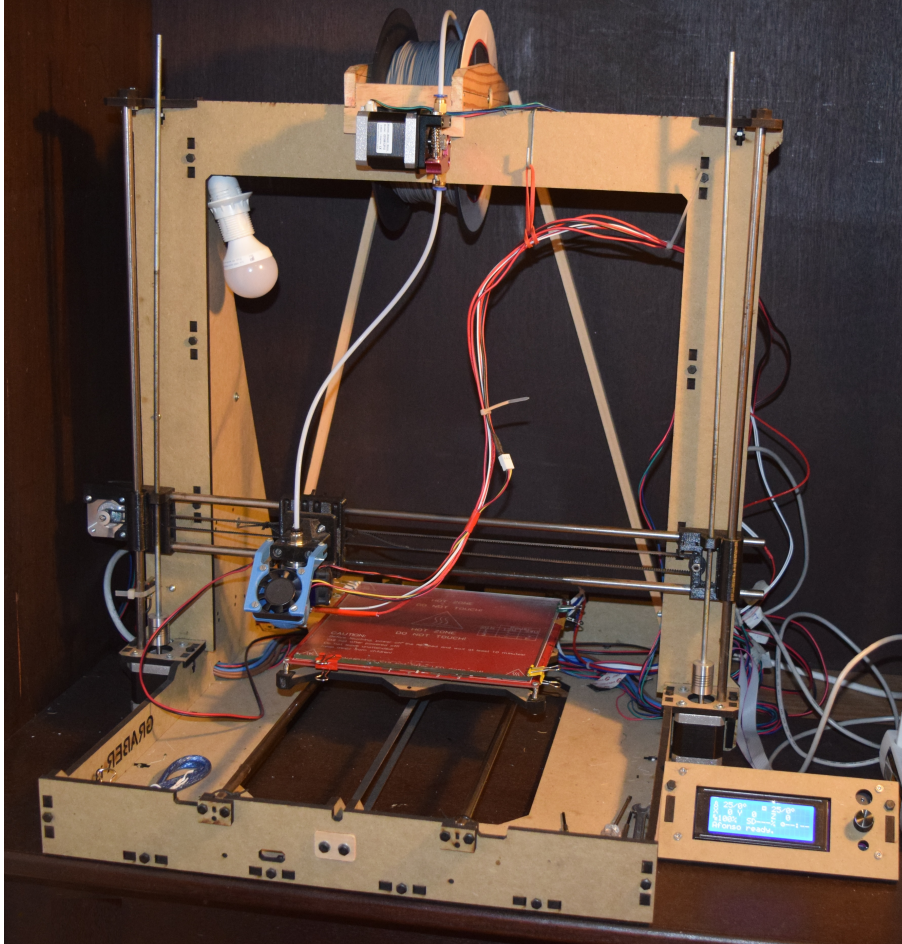


Figura 6.1: Impressora utilizada para fabricação das topologias analisadas.

### 6.3 Descrição da montagem

O primeiro objetivo do procedimento experimental foi a obtenção de um dispositivo de construção simples e rápida que permitisse efetuar os ensaios de rutura e deformação pretendidos. Eram premissas obrigatórias a existência de um cilindro fixado a um suporte base e colado na estrutura da nervura que simulasse a presença da longarina, a construção de um sistema que permitisse unificar a colocação de carga num único ponto e a distribuisse de acordo com o pretendido, a existência de elementos de ligação entre esse mesmo sistema de carga e a estrutura da nervura e a colocação de estruturas auxiliares que limitassem a flambagem transversal das topologias analisadas. Este último ponto é de particular relevância uma vez que nos ensaios numéricos a pressão é aplicada sempre de forma perpendicular à superfície provocando assim deformação unicamente na direção de aplicação carga. No entanto, a replicação exata destas condições experimentalmente é um processo que possui um baixo nível de fiabilidade, sendo por isso necessário limitar o movimento da nervura no sentido perpendicular à linha da corda,

de modo a garantir que os resultados obtidos podem ser equiparados às soluções obtidas numericamente. A conjugação de todas estas condições resultou naquela que seria a primeira proposta para a estrutura utilizada durante os ensaios experimentais (ver Figura 6.2).

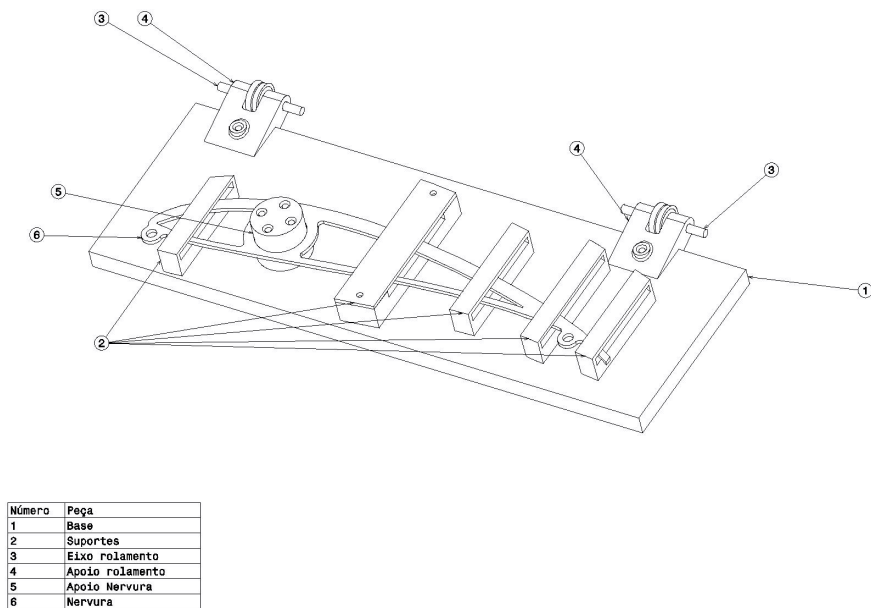


Figura 6.2: Representação isométrica da montagem experimental utilizada durante os ensaios de deformação.

Na Figura 6.2 a peça número 5 representa a configuração do círculo central utilizado, este possui duas secções com diâmetros distintos, possuindo a secção inferior um diâmetro ligeiramente superior que apenas serve para apoiar a nervura. O conjunto de estruturas que foram colocadas ao longo da linha da corda de modo a limitar a tendência de flambagem da estrutura encontram-se representadas pelo número 2. O componente representado pelo número 4 representa a estrutura que serve de ligação entre os pontos de aplicação das cargas na nervura e o sistema utilizado para a colocação do carregamento pretendido, servindo também de apoio para o rolamento cujo veio encontra-se representado pelo número 3. Por fim a peça associada ao número 1 representa a estrutura de base. Os componentes associados aos números 2, 4 e 5, tal como a estrutura da nervura, foram construídos com recurso a fabrico aditivo. Por outro lado, os componentes associados aos números 1 e 3 foram construídos em madeira. O sistema para colocação da carga foi constituído por um pequeno pedaço de madeira o qual era conectado aos pontos de aplicação da carga através de fios de nylon com um pequeno gancho preso na ponta (ver Figura 6.3). Ligado também a esta estrutura de madeira estava também um recipiente para a colocação de grãos de chumbo para carregar a estrutura (ver Figura 6.4).



Figura 6.3: Ligação entre o suporte de madeira a estrutura da nervura.

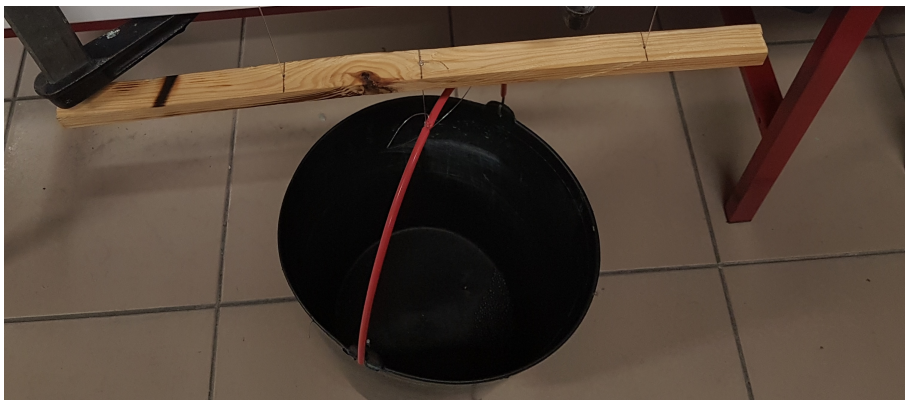


Figura 6.4: Ligação entre o recipiente para colocação de carga e o suporte de madeira.

A colocação deste recipiente na estrutura de madeira foi posicionada num ponto específico de modo a garantir que a proporção de forças nas duas extremidades de aplicação de carga na nervura fosse concordante com os cálculos previamente efetuados. Para efetuar as medições da deformação foi utilizado um comparador o qual estava ligado à estrutura da nervura através de um gancho (ver Figura 6.5). A constituição final da montagem utilizada para os ensaios de deformação encontra-se representada na Figura 6.6.





Figura 6.5: Colocação do comparador para medição da deformação.



Figura 6.6: Montagem experimental final utilizada nos ensaios de deformação.

No que diz respeito aos ensaios de rutura o objetivo estabelecido foi carregar a estrutura até à falha. No entanto, a montagem utilizada para os ensaios de deformação, representada na Figura 6.6, revelou-se inadequada. Tal como se pode verificar pelas Figuras 6.7 e 6.8, para cargas mais elevadas as estruturas colocadas com o objetivo de impedir a flambagem mostraram-se insuficientes, sendo por isso necessário efetuar modificações na montagem experimental.

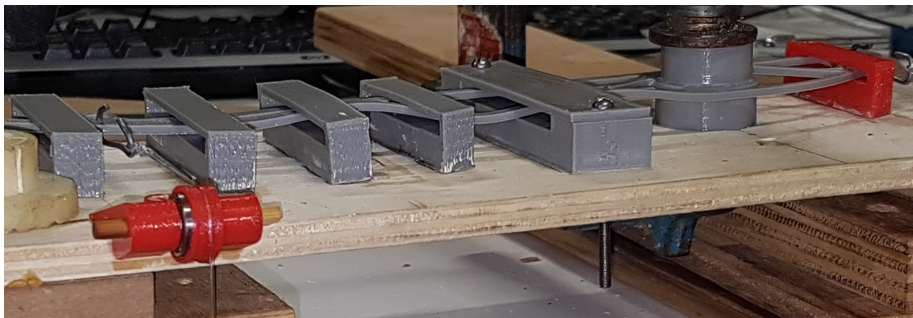


Figura 6.7: Primeira exemplificação da flambagem provocada na estrutura quando esta se encontrava solicitada por cargas elevadas.

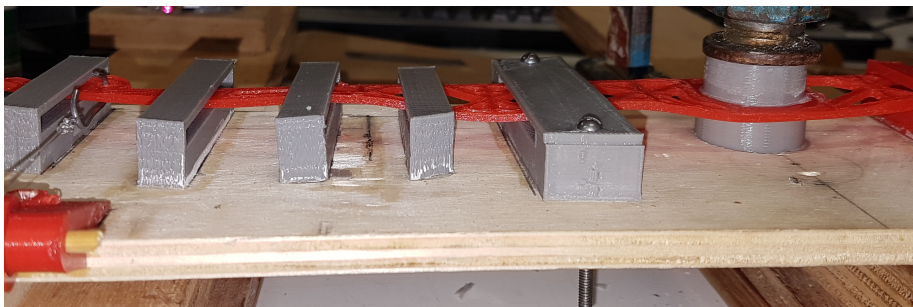
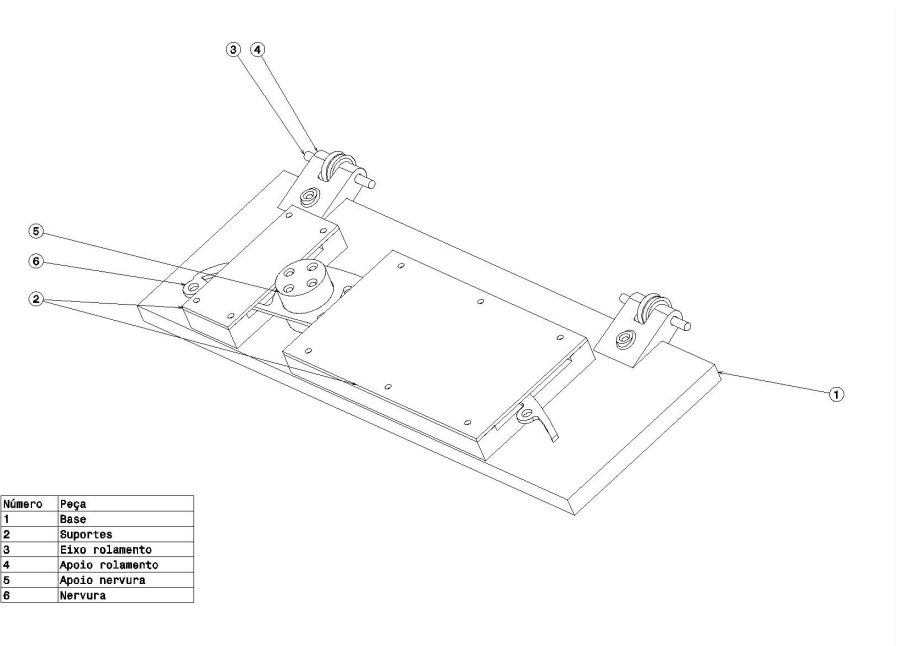


Figura 6.8: Segunda exemplificação da flambagem provocada na estrutura quando esta se encontrava solicitada por cargas elevadas.

As alterações efetuadas passaram por colocar estruturas que limitassem a tendência de flambagem da nervura em toda a linha da corda, exceto nas zonas onde essa colocação fosse impedida quer pela simulação da presença da longarina quer pela presença dos pontos de aplicação da carga. Desta modificação na montagem experimental resultou o dispositivo represento na Figura 6.9.



Número	Peça
1	Base
2	Suportes
3	Eixo rolamento
4	Apoio rolamento
5	Apoio nervura
6	Nervura

Figura 6.9: Representação isométrica da montagem experimental utilizada durante os ensaios de rutura.

Por questões de visualização e montagem os componentes representados pelo número 2 foram construídos em peças distintas, ou seja, as superfícies inferiores foram fabricadas através de impressão 3D e as superfícies superiores foram construídas com recurso a placas de acrílico. Todos os restantes componentes são idênticos aos presentes na montagem experimental utilizada durante os ensaios de deformação (ver Figura 6.2). A montagem final utilizada durante os ensaios de rutura encontra-se apresentada na Figura 6.10.

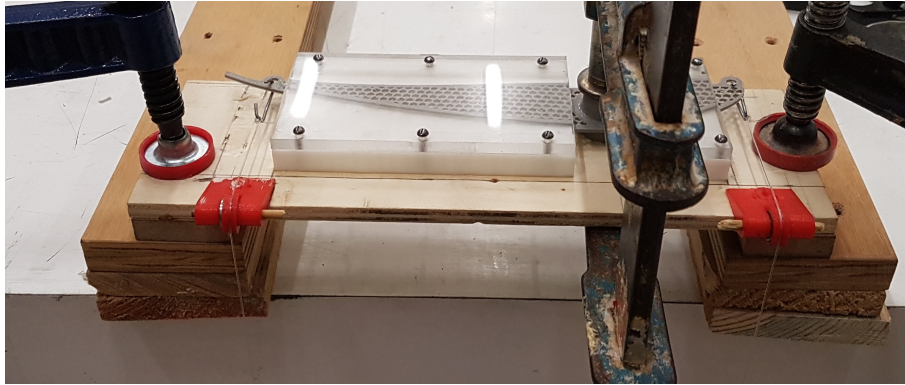


Figura 6.10: Montagem experimental final utilizada nos ensaios de rutura.

### 6.4 Resultados dos ensaios experimentais

As topologias testadas experimentalmente encontram-se representadas com o mesmo seguimento utilizado no capítulo 4 (ver Figuras 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20), sendo adicionalmente acresceantados as topologias obtidas durante o primeiro conjunto de optimizações topológicas efetuadas no capítulo 5 (ver Figuras 6.21 e 6.22). A apresentação dos resultados experimentais é efetuada em três etapas. Primeiramente são apresentados os resultados obtidos pela medição da massa das topologias analisadas, de seguida são descritos os resultados dos ensaios de deformação e por fim são expostos os resultados obtidos pelos ensaios de rutura. Todos os resultados são representados na mesma tabela onde são identificadas as topologias acompanhadas das respetivas massas, deformações e cargas de rutura obtidas.



Figura 6.11: Primeira topologia após a sua fabricação.



Figura 6.12: Segunda topologia após a sua fabricação.





Figura 6.13: Terceira topologia após a sua fabricação.



Figura 6.14: Quarta topologia após a sua fabricação.



Figura 6.15: Quinta topologia após a sua fabricação.



Figura 6.16: Sexta topologia após a sua fabricação.



Figura 6.17: Sétima topologia após a sua fabricação.



Figura 6.18: Oitava topologia após a sua fabricação.



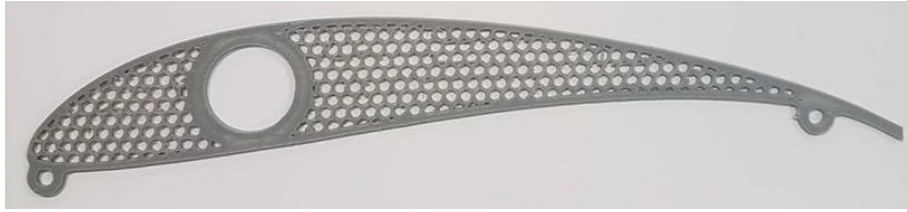


Figura 6.19: Nona topologia após a sua fabricação.



Figura 6.20: Décima topologia após a sua fabricação.



Figura 6.21: Primeira topologia resultante do primeiro conjunto de otimizações topológicas após a sua fabricação.



Figura 6.22: Segunda topologia resultante do primeiro conjunto de otimizações topológicas após a sua fabricação.

Na Tabela 6.2 temos apresentados os resultados obtidos durante o procedimento experimental.

## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

Tabela 6.2: Resultados obtidos pela medição da massa, da deformação e da carga de rutura das várias topologias.

Topologia	Massa medida experimentalmente [g]	Deformação [mm]	Carga de rutura [kg]
1	6,6	1,07	20,250
2	6,7	0,97	12,050
3	6,7	0,93	14,970
4	6,7	0,91	12,185
5	6,7	0,91	20,410
6	6,6	0,92	14,160
7	6,8	1,10	11,865
8	6,6	1,15	8,420
9	6,7	1,12	11,505
10	6,7	1,01	11,115
1ª otimização do 1º conjunto	6.6	0.70	13.210
2ª otimização do 1º conjunto	5.2	0.86	8.600

## Capítulo 7

### Discussão de resultados

Depois de apresentar os resultados numéricos e experimentais, fez-se uma comparação por forma a avaliar a precisão dos resultados numéricos quando comparados com os resultados experimentais. Esta confrontação de resultados será dividida em diversas fases de modo a avaliar de forma individual cada um dos parâmetros medidos experimentalmente, tecendo as respetivas críticas e retirando as devidas ilações.

As comparações realizadas englobam as análises efetuadas às topologias utilizadas durante as análises referentes ao primeiro carregamento e às topologias geradas durante o primeiro conjunto de otimizações topológicas efetuadas. O primeiro parâmetro que foi avaliado foi a massa, sabe-se que a densidade do PLA varia consoante o fabricante pelo que a avaliação da massa final das topologias obtidas constitui o ponto de partida no que confere a comparação com os dados numéricos. Na Tabela 7.1 temos representados os resultados obtidos através da comparação entre o valor da massa medido experimentalmente e aquele sugerido pelo modelo numérico com base no valor de densidade inserido.

Tabela 7.1: Comparação entre a massa sugerida pelas simulações numéricas e a massa medida experimentalmente.

Topologia	Massa obtida pelo modelo numérico [g]	Massa medida experimentalmente [g]	Diferença [g]
1	6,70	6,6	0,1
2	6,81	6,7	0,11
3	6,72	6,7	0,02
4	6,86	6,7	0,16
5	6,87	6,7	0,17
6	6,63	6,6	0,03
7	6,81	6,8	0,01
8	6,74	6,6	0,14
9	6,79	6,7	0,09
10	6,77	6,6	0,17
1ª otimização do 1º conjunto	6,77	6,6	0,17
2ª otimização do 1º conjunto	5,31	5,2	0,11

Analisando os resultados obtidos na Tabela 7.1 conclui-se que a massa das topologias testadas experimentalmente é equiparável àquela obtida pelo modelo numérico. Os valores obtidos experimentalmente são globalmente mais baixos, o que indica que a densidade inserida pode estar ligeiramente acima da densidade real do material utilizado. Por fim, é importante referir que a balança utilizada possui uma incerteza de 0,1 g o que significa uma precisão 10 mais baixa em relação aos resultados extraídos das simulações numéricas.

Na Tabela 7.2 encontra-se descrita a comparação entre os valores de deformação máxima indicada pelo modelo numérico e aquela medida experimentalmente.

Tabela 7.2: Comparação entre as deformações obtidas pelo modelo numérico e aquelas medidas experimentalmente.

Topologia	Deformação obtida pelo modelo numérico [mm]	Deformação medida experimental [mm]	Diferença percentual
1	1,15	1,07	-7,48%
2	0,99	0,97	-2,06%
3	0,97	0,93	-4,30%
4	0,96	0,91	-5,49%
5	0,97	0,91	-6,59%
6	0,95	0,92	-3,26%
7	1,18	1,10	-7,27%
8	1,23	1,15	-6,96%
9	1,15	1,12	-2,68%
10	1,05	1,01	-3,96%
1 <sup>a</sup> otimização do 1 <sup>o</sup> conjunto	0,73	0,70	-4,29%
2 <sup>a</sup> otimização do 1 <sup>o</sup> conjunto	0,89	0,86	-3,48%

Neste caso é importante salientar que a zona de medição da deformação durante o procedimento experimental não coincide exatamente com o ponto de deformação máxima, mas sim com a zona onde existe uma maior deformação. Pelo que as diferenças registadas podem advir da comparação dos resultados obtidos experimentalmente com o valor nominal máximo e não com o valor exato registado pelo modelo numérico na zona de medição. Outra conclusão relevante é que as deformações medidas experimentalmente encontram-se abaixo das obtidas pelo modelo numérico. De uma forma geral, podemos considerar que os resultados obtidos para a avaliação deste parâmetro são satisfatórios uma vez que as tendências obtidas numericamente são verificadas, além disso as diferenças percentuais observadas são pequenas e tal como supradito, encontram-se inflacionadas.

Na Tabela 7.3 encontra-se representada a comparação entre a ordem de rutura das topologias durante os ensaios experimentais, onde a primeira topologia a falhar representa aquela que aguenta a menor carga, e a ordem decrescente de tensão máxima identificada pelo modelo numérico. Com esta análise pretende-se verificar se as topologias cuja tensão máxima é mais elevada são efetivamente as primeiras a falhar.

## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

Tabela 7.3: Comparação entre os resultados numéricos e experimentais relacionados com a resistência das topologias analisadas.

Topologia	Tensão obtida pelo modelo numérico [MPa]	Ordem decrescente de tensão máxima	Carga de rutura obtida nos ensaios experimentais [kg]	Ordem crescente de entrada em rutura	Diferença entre rankings obtidos
1	7,54	1	20,250	11	+10
2	4,78	3	12,050	6	+3
3	3,29	10	14,970	10	0
4	3,43	9	12,185	7	-2
5	3,89	8	20,410	12	+4
6	4,12	7	14,160	9	-2
7	5,05	2	11,865	5	+3
8	4,39	5	8,420	1	-4
9	4,65	4	11,505	4	0
10	4,27	6	11,115	3	-3
1ª otimização do 1º conjunto	2,34	12	13,210	8	-4
2ª otimização do 1º conjunto	3,06	11	8,600	2	-9

Na Figura 7.1 temos presente o estado das nervuras após os ensaios de rutura.

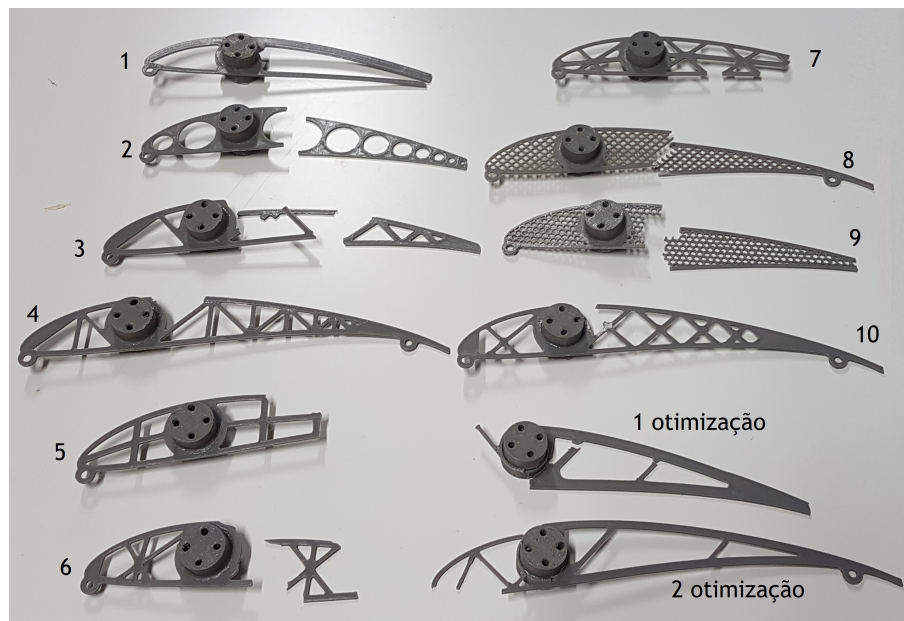


Figura 7.1: Estado das nervuras após os ensaios de rutura.

Analisando os resultados expressos na Tabela 7.3 podemos agrupar estes em 3 grupos distintos. Um primeiro grupo em que os resultados obtidos encontram-se de acordo com o esperado ou seja, a diferença de rankings obtidos é pequena ou inexistente. Neste grupo enquadram-se as terceira, quarta, sexta e nona topologias. O grupo seguinte agrupa as topologias cujos resultados obtidos, embora não sendo totalmente correspondentes com o esperado, podem ser encarados como satisfatórios tendo em conta as limitações evidenciadas durante os ensaios experimentais. Neste grupo estão incluídos as segunda, quinta, sétima, oitava e décima topologias e a 1ª otimização do 1º conjunto. O último grupo inclui as topologias cujos resultados obtidos estão longe do esperado ou seja, existe uma grande diferença entre os resultados numéricos e

os experimentais. Neste grupo estão inseridos a primeira topologia e a 2ª otimização do 1º conjunto. Analisando os resultados de uma forma geral observa-se que a maioria das nervuras apresenta uma diferença de ranking negativa. Este resultado indica que a maioria das topologias analisadas entraram em rutura numa posição inferior à esperada, ou seja, seria expectável que suportassem uma carga superior comparativamente a outras topologias. Um dos objetivos dos ensaios de rutura era identificar a zona de falha em cada uma das topologias. Para isso, será feita uma análise individual de cada uma das topologias testadas com suporte na Figura 7.1.

A primeira topologia apresentou uma carga de rutura bastante superior à esperada, sendo inclusivé a topologia que apresenta a maior disparidade entre resultados numéricos e experimentais. Este resultado pode estar relacionado com o fenómeno de flambagem. A modificação da montagem experimental, tal como supradito, teve como principal objectivo minimizar a interferência da flambagem nos resultados obtidos. No entanto, para esta topologia em concreto, a sua maior mobilidade resultado da ausência de elementos de ligação entre as partes superior e inferior da nervura contribui significativamente para o encurvamento da superfície da nervura fazendo com que a mesma absorva muito mais energia e consequentemente aguente uma carga muito superior. No que concerne à zona onde a nervura falha, verifica-se na Figura 7.1 que esta entra em falha junto ao bordo de fuga na união entre as mesas superior e inferior da nervura. Este resultado revela-se coerente com os resultados numéricos (ver Figura 4.29).

A segunda topologia enquadra-se no grupo de resultados intermédio, no qual apesar de os resultados não serem totalmente coerentes podem ser considerados satisfatórios. No que diz respeito à zona de falha, os resultados expressos na Figura 7.1 são esclarecedores e coerentes com o resultado da simulação numérica efetuada, expresso na Figura 4.30.

A terceira topologia representa uma das topologias cuja ordem de entrada em rutura correspondente na integra ao esperado. Por outro lado, os resultados evidenciados na Figura 7.1 não são totalmente esclarecedores, sendo por isso impossível identificar com clareza qual a zona da nervura que entre primeiramente em falha. No entanto, uma das zonas onde a nervura se encontra partida corresponde à zona de tensão máxima identificada na Figura 4.31.

A quarta topologia, à semelhança da topologia anterior, enquadra-se no grupo de resultados em que a diferença observada é pequena ou inexistente. No que concerne à zona de falha, esta topologia representa o resultado mais clarificador uma vez que, essa mesma zona é facilmente visível na Figura 7.1. Além disso, este resultado é coerente com as análises numéricas efetuadas (ver Figura 4.32).

A quinta topologia enquadra-se no grupo dos resultados intermédios pela razões acima supraditas. No que concerne à zona de falha, é totalmente impossível estabelecer uma comparação com o resultado indicado na Figura 4.33. Esta topologia representa uma daquelas que devido ao impacto provocado após a falha da nervura ficou estilhaçada (ver Figura 7.1), sendo impossível identificar com certeza qual a zona que entrou inicialmente em falha.

A sexta topologia, à semelhança da quarta, apresenta uma diferença de ranking pequena, sendo por isso encarado como uma das topologias que apresenta melhores resultados. No entanto, a identificação da zona de falha é inviável porque à semelhança da nervura anterior esta topologia fragmentou-se em diversos pedaços após a falha. Logo, a comparação com os resultados numéricos, Figura 4.34 não é possível.

A sétima topologia representa mais uma topologia que se encontra incluída no segundo grupo de resultados. No que diz respeito à identificação da zona de falha, os resultados expressos na Figura 7.1 não são totalmente conclusivos. No entanto, ao estabelecer um paralelo com a imagem 4.35 verifica-se que uma das zonas onde a nervura se fragmentou coincide com a localização da tensão máxima identificada pelo modelo numérico.

A oitava topologia, à semelhança da topologia anterior, encontra-se incluída no grupo de resultados intermédio. Comparando a zona de falha identificada pelas simulações numéricas (ver Figura 4.36) com os resultados obtidos pelos ensaios experimentais presentes na Figura 7.1 verifica-se que a zona de falha observada durante os estudos experimentais encontra-se ligeiramente mais requada relativamente à indicação do modelo numérico.

A nona topologia representa uma das topologias cuja ordem de rutura se enquadra perfeitamente com o esperado ou seja, a diferença de rankings obtida é nula. No que se refere à identificação da zona de falha, os resultados obtidos experimentalmente (ver Figura 7.1) mostram que existe falha ao longo de toda a nervura, desde a superfície superior até à inferior. Comparando este resultado com as análises numéricas (ver Figura 4.37) verifica-se que a falha indicada pelo modelo numérico junto à superfície inferior da nervura se propagou, originando a fragmentação da nervura em duas partes separadas.

A décima topologia assim como a maioria das nervuras analisadas enquadra-se no segundo grupo de resultados obtidos. Relativamente à visualização do ponto de falha durante os ensaios experimentais, à semelhança do ocorrida para a terceira topologia, é facilmente identificável a zona de falha da nervura (ver Figura 7.1). Estabelecendo um paralelo com os resultados numéricos, Figura 4.38, conclui-se que existe uma total coerência uma vez que a nervura entra em falha exatamente no ponto de tensão máxima exibido pelo modelo numérico.

A topologia resultante da 1ª otimização do 1º conjunto, à semelhança da maioria das topologias analisadas, enquadra-se no grupo de resultados intermédio. A identificação da zona de falha para esta nervura não é exequível uma vez que esta se fragmenta em diversos pontos, tal como visível na Figura 7.1. Na Figura 5.15 é possível identificar várias zonas em que a tensão é muito aproximada da tensão máxima existente na nervura, daí que a nervura tenha falhado em diversos pontos.

Por último, a 2ª otimização do 1º conjunto enquadra-se no grupo em que os resultados obtidos experimentalmente se revelam bastante diferenciados dos numéricos. Esta topologia, em termos experimentais, registou uma carga de rutura relativamente baixa quando comparado com as restantes topologias. Ao analisar a zona de falha observada durante os ensaios experimentais (ver Figura 7.1), conclui-se que a nervura se fragmenta apenas a montante da posição da longarina. Este resultado não seria de todo expectável, uma vez que examinando os resultados obtidos pelas simulações numéricas (ver Figura 5.21) verifica-se que as tensões mais elevadas encontram-se a jusante da posição da longarina. Esta discordância entre resultados numéricos e experimentais pode ser atribuída a três pontos distintos. Em primeiro lugar, a influência do encastramento a montante da posição da longarina pode não estar devidamente refletida experimentalmente uma vez que, a limitação de todos os graus de liberdade é um processo difícil de reproduzir. Em segundo, uma estrutura demasiadamente fina, tal como a presente a montante da posição da longarina, pode apresentar instabilidade nomeadamente quando sujeita a esforços de compressão, situação esta não prevista pelo modelo numérico. Por fim, pode existir algum defeito na impressão que devido à reduzida largura da mesa afete uma porção significativa da secção, reduzindo assim localmente a resistência da nervura. Fazendo uma análise separada dos resultados obtidos durante os ensaios experimentais das topologias provenientes das otimizações topológicas é possível retirar algumas conclusões relevantes no que concerne ao benefício do uso desta tecnologia. A segunda otimização suporta uma carga menor, resultado este esperado devido à diminuição de massa desta topologia comparativamente à primeira. As vantagens previstas em termos de deformação máxima são atingidas experimentalmente ou seja, a rigidez da topologia da nervura é maximizada. No que diz respeito à resistência das topologias, os resultados obtidos experimentalmente expõem algumas fragilidades associadas à otimização

topológica. Uma particularidade dos resultados obtidos durante os ensaios experimentais realizados às topologias provenientes da otimização topológica é o facto de estas representarem as únicas configurações que falham a montante da posição da longarina. Esta singularidade revela que este processo é demasiado otimista na previsão das propriedades mecânicas na zona do bordo de ataque, removendo uma quantidade excessiva de material.



## Capítulo 8

### Conclusões e Recomendações

#### 8.1 Conclusões

Com o objetivo de comprovar o benefício do uso de tecnologias de fabrico aditivo na indústria aeronáutica procedeu-se ao projeto e ensaio de diversas topologias para a estrutura de uma nervura aplicada a um contexto real. As topologias analisadas resultaram da aplicação de configurações estruturais típicas, nomeadamente treliças, favo de mel, entre outras. Adicionalmente, na tentativa de procura de topologias não triviais recorreu-se a métodos de otimização estrutural para procurar soluções capazes de introduzir melhoramentos no desempenho estrutural das topologias inicialmente propostas.

Para averiguar este mesmo desempenho, realizaram-se análises estruturais estáticas com vista à determinação de três parâmetros fundamentais. Estes parâmetros foram a deformação máxima, a tensão equivalente de von-Mises máxima e a energia de deformação. As simulações numéricas efetuadas dividiram-se em dois carregamentos distintos, um modelo simplificado fruto da necessidade de estudar numericamente uma situação cuja reprodução experimental fosse viável e um segundo caso em que o carregamento testado se aproximasse da realidade. No que diz respeito à metodologia experimental, os objetivos passaram pela construção de um dispositivo de ensaio que permitisse quantificar a deformação registada aquando da aplicação do primeiro carregamento e posteriormente carregar as nervuras até à rutura por forma a validar o modelo numérico.

Os resultados obtidos permitiram concluir que a análise independente de dois carregamentos diferenciados foi adequada, uma vez que permitiu validar experimentalmente os resultados associados às simulações numéricas efetuadas para o carregamento simplificado e posteriormente proceder a uma avaliação das topologias propostas quando estes se encontravam sujeitas a um carregamento mais coerente com a realidade. Das topologias inicialmente propostas verificou-se que as configurações em treliça são aquelas que providenciam um desempenho estrutural mais eficiente. Adicionalmente conclui-se que o primeiro critério a falhar é a rigidez ou seja, o factor limitativo para a conceção das estruturas é a deformação registada. Outro objetivo inerente a este trabalho foi a utilização de modelos de otimização estrutural e sua respetiva validação. Neste campo os resultados obtidos foram particularmente satisfatórios uma vez que a processo de otimização topológica revelou-se capaz de propor geometrias com desempenho superior ao conjunto de topologias propostas inicialmente. No entanto, o processo de suavização da geometria resultante da otimização revelou-se bastante minucioso e demorado, sendo necessárias ainda algumas evoluções para tornar esta ferramenta num utensílio universal. De um modo geral, este trabalho comprovou que o fabrico aditivo constitui uma alternativa viável ao fabrico tradicional.

## 8.2 Trabalhos futuros

A realização de trabalhos futuros dentro desta temática apresenta uma diversa panóplia de soluções. Uma linha de investigação possível é estudar a viabilidade de fabricar outros componentes de uma asa com recurso a impressão 3D, como por exemplo a estrutura da casca. A avaliação do impacto da fadiga na resistência dos materiais utilizados na impressão 3D pode constituir um estudo relevante uma vez que é de extrema importância entender qual a influência de cargas cíclicas nas propriedades dos materiais e no respetivo tempo de vida útil. Outro ramo passível de estudo é averiguar em termos quantitativos quais os benefícios e as desvantagens de utilizar outros métodos de fabrico aditivo ou de recorrer a outro tipo de material utilizado na tecnologia FDM. Dentro da abordagem estabelecida durante este trabalho algumas melhorias e alguns desenvolvimentos podem ser realizados. Estes podem ser divididos em duas áreas: numéricos e experimentais. Cada um desses grupos será discutido separadamente.

### 8.2.1 Numéricos

No que concerne às simulações numéricas um dos fatores que deve ser encarado como prioridade para trabalhos futuros é a correta caracterização do material utilizado. Tal como descrito ao longo do trabalho, os materiais utilizados nos processos de impressão 3D apresentam características anisotrópicas pelo que a definição das suas propriedades mecânicas é um processo complexo que possui um grau de precisão relativamente baixo. Estas mesmas propriedades são altamente influenciáveis por alguns parâmetros de impressão, nomeadamente, temperatura de extrusão, processo de arrefecimento e velocidade de impressão. Devido a todos estes fatores, a investigação da influência de todos estes fenómenos nas propriedades dos materiais deve ser encarada como uma prioridade a curto prazo com o objetivo de aumentar a precisão dos resultados provenientes das simulações numéricas. Outro ponto que pode ser desenvolvido no futuro está relacionado com o processo de otimização topológica. Deve-se averiguar quais as imperfeições evidenciadas pelo software no que diz respeito ao cumprimento na íntegra das metas de otimização estabelecidas e consequentemente encontrar formas de contornar essas mesmas limitações.

### 8.2.2 Experimentais

Em relação ao estudo experimental efetuado existem também alguns pontos sobre os quais devem incidir melhoramentos em trabalhos futuros. A principal adversidade encontrada foi a aplicação do carregamento de forma perpendicular à superfície da nervura. A criação de pequenas inclinações durante a imposição das cargas criou regularmente fenómenos de flambagem nas estruturas. Esta contrariedade fazia com que as mesmas fossem capazes de aguentar cargas superiores às previstas devido a maior absorção de energia por parte da estrutura. Outro desenvolvimento possível está relacionado com a identificação da zona de falha de algumas configurações. Tal como abordado na discussão de resultados algumas das topologias analisadas experimentalmente fragmentaram-se em diversos pontos, pelo que a filmagem dos ensaios poderia facilitar a identificação da zona que primeiramente entrou em falha.

## Bibliografia

- [1] G. D. Goh, S. Agarwala, G. L. Goh, V. Dikshit, S. L. Sing, e W. Y. Yeong, “Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 63, pp. 140-151, apr 2017. 3, 4, 7, 14, 19
- [2] C. Ferro, R. Grassi, C. Seclì, e P. Maggiore, “Additive Manufacturing Offers New Opportunities in UAV Research,” in *CIRP Conference on Manufacturing Systems*, vol. 41, 2016, pp. 1004-1010. 3
- [3] B. Berman, “3-D printing: The new industrial revolution,” *Business Horizons*, vol. 55, no. 2, pp. 155-162, 2012. 3
- [4] Charles W.Hull, “Apparatus for production of three-dimensional objects by Stereolithography,” *U.S. Patent N.º.4575330*, 1986. 3
- [5] Carl R. Deckard, “Method and apparatus for producing parts by selective sintering,” *U.S. Patent N.4863538*, 1989. 3
- [6] S. Scott Crump, “Apparatus and method for creating three-dimensional objects,” *U.S Patent N.º5121329*, 1992. 3
- [7] G. Hayes, “A brief history of personal 3D printing,” *Ultimate guide to 3D printing*, 2013. 3
- [8] E. Matias e B. Rao, “3D printing: On its historical evolution and the implications for business,” in *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology*. IEEE, aug 2015, pp. 551-558. 3
- [9] Ellen Macarthur Foundation, “Towards the circular economy,” Tech. Rep., 2014. 4
- [10] T. Campbell, C. Williams, O. Ivanova, e B. Garrett, “Could 3D Printing Change the World,” Atlantic Council, Tech. Rep., 2011. 5
- [11] D. Drummer, S. Cifuentes-Cuellar, e D. Rietzel, “Suitability of PLA/TCP for fused deposition modeling,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 18, no. 6, pp. 500-507, sep 2012. 5
- [12] J. Griffey, “Types of Plastics,” in *Library Technology Reports*. ALA TechSource, 2014, ch. 3. 5
- [13] A. Bagsik, V. Schöppner, e E. Klemp, “FDM Part Quality Manufactured with Ultem\*9085,” in *Polymeric Materials*, 2010. 5
- [14] S. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, e P. K. Wright, “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 248-257, oct 2002. 5, 12, 13
- [15] J. Mireles, D. Espalin, D. Roberson, B. Zinniel, F. Medina, R. Wicker, e . W. M. Keck, “Fused Deposition Modeling of Metals,” in *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2012. 5
- [16] L. Bullock, “Introduction to 3D Printing,” Ministry for education and employment Malta, Tech. Rep., 2014. 5
- [17] A. T. Castanheira, “Impressão 3D de estruturas para isolamento térmico,” Ph.D. dissertation, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 2016. 6, 8, 10

- [18] C. Chua, K. Leong, e C. Lim, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, 2nd ed. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003. 6
- [19] C. Reinders, K. Kreiskother, A. Kampker, e C. Deutskens, "Reducing Production Costs of E-Mobility Components by Using Polyjet 3D Printing," in *56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, jan 2015. 6
- [20] Y. Yap e W. Yeong, "Shape recovery effect of 3D printed polymeric honeycomb," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, no. 2, pp. 91-99, apr 2015. 6
- [21] F. P. Melchels, J. Feijen, e D. W. Grijpma, "A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering," *Biomaterials*, vol. 31, no. 24, pp. 6121-6130, aug 2010. 7
- [22] G. D. Kim e Y. T. Oh, "A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 222, no. 2, pp. 201-215, oct 2008. 7
- [23] S. Kumar, "Selective laser sintering: A qualitative and objective approach," *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 55, no. 10, pp. 43-47, oct 2003. 8
- [24] J. Choren, V. Gervasi, T. Herman, S. Kamara, e J. Mitchell, "SLS Powder Life Study," in *SFF Symposium*, 2001. 8
- [25] A. Sachdeva, S. Singh, e V. S. Sharma, "Investigating surface roughness of parts produced by SLS process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 9-12, pp. 1505-1516, feb 2013. 8
- [26] R. Udriou e L. A. Mihail, "Experimental determination of surface roughness of parts obtained by rapid prototyping," *Manufacturing Engineering Department Transilvania University of Brasov, Brasov, Tech. Rep.*, 2009. 8
- [27] Cambrigde - JIC, "Comparison of 3D printing materials," *International Genetically Engineered Machine (iGEM) Foundation, Tech. Rep.*, 2015. 9, 24
- [28] B. Tymrak, M. Kreiger, e J. Pearce, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions," *Materials & Design*, vol. 58, pp. 242-246, jun 2014. 9
- [29] Stratasys, "ULTEM 9085," *Tech. Rep.*, 2013. 9
- [30] Höganäs, "Manufatura aditiva de peças metálicas pequenas e complexas," *Tech. Rep.*, 2016. 9
- [31] A. A. Zadpoor e J. Malda, "Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, and Organs," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 1-11, jan 2017. 9
- [32] D. Espalin, J. Alberto Ramirez, F. Medina, e R. Wicker, "Multi-material, multi-technology FDM: exploring build process variations," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 236-244, apr 2014. 11

- [33] B. Jackson, K. Wood, e J. J. Beaman, “Discrete Multi-Material Selective Laser Sintering (M 2 SLS): Development for an Application in Complex Sand Casting Core Arrays,” in *SFF Symposium*, 2003. 11
- [34] J.-W. Choi, H.-C. Kim, R. Wicker, e W. M. Keck, “Multi-material stereolithography,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, pp. 318-328, 2010. 11
- [35] C. Lee e J. A. Tarbutton, “Electric Poling-assisted Additive Manufacturing Process for Lead-free Piezoelectric Device Fabrication,” *Procedia Manufacturing*, vol. 1, pp. 320-326, 2015. 11
- [36] S. A. Tawfik, D. Stefan Dancila, e E. Armanios, “Unsymmetric composite laminates morphing via piezoelectric actuators,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 7, pp. 748-756, jul 2011. 11
- [37] M. Zarek, M. Layani, I. Cooperstein, E. Sachyani, D. Cohn, e S. Magdassi, “3D Printing of Shape Memory Polymers for Flexible Electronic Devices,” *Advanced Materials*, vol. 28, no. 22, pp. 4449-4454, jun 2016. 11
- [38] O. Kerbrat, P. Mognol, e J.-Y. Hascoët, “A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing,” *Computers in Industry*, vol. 62, no. 7, pp. 684-692, sep 2011. 11
- [39] A. Joe Lopes, E. MacDonald, e R. B. Wicker, “Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 129-143, mar 2012. 11
- [40] R. Janssen, I. Blankers, E. Moolenburgh, e B. Posthumus, “TNO: The Impact Of 3-D Printing on Supply Chain Management,” TNO innovation for life, Tech. Rep., 2014. 12
- [41] S. H. Khajavi, J. Partanen, e J. Holmström, “Additive manufacturing in the spare parts supply chain,” *Computers in Industry*, vol. 65, no. 1, pp. 50-63, jan 2014. 12
- [42] P. E. I. Pounds, “Paper Plane: Towards Disposable Low-Cost Folded Cellulose-Substrate UAVs,” in *Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2012, p. 9. 12
- [43] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, e S. Wang, “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 80, pp. 369-378, oct 2015. 12
- [44] R. Zou, Y. Xia, S. Liu, P. Hu, W. Hou, Q. Hu, e C. Shan, “Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 99, pp. 506-513, aug 2016. 12, 30
- [45] S. Easter, J. Turman, D. Sheffler, M. Balazs, e J. Rotner, “Using advanced manufacturing to produce unmanned aerial vehicles: a feasibility study,” University of Virginia and MITRE Corporation, Tech. Rep., 2013. 13, 19
- [46] U.S. Department of Transportation, *Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe*, 2012. 15
- [47] TU Delft, “Introduction to Aerospace Engineering,” 2011. 15
- [48] P. Zhang, J. Liu, e A. C. To, “Role of anisotropic properties on topology optimization of additive manufactured load bearing structures,” *Scripta Materialia*, vol. 135, pp. 148-152, jul 2017. 16

- [49] G. Rozvany, "Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 21, no. 2, pp. 90-108, apr 2001. 16, 17, 18
- [50] G. Allaire, Z. Belhachmi, e F. Jouve, "The homogenization method for topology and shape optimization. Single and multiple loads case," *Revue Européenne des Éléments Finis*, vol. 5, no. 5-6, pp. 649-672, jan 1996. 17
- [51] K. Suzuki e N. Kikuchi, "A homogenization method for shape and topology optimization," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 93, no. 3, pp. 291-318, dec 1991. 18
- [52] L. E. Murr, S. M. Gaytan, F. Medina, H. Lopez, E. Martinez, B. I. Machado, D. H. Hernandez, L. Martinez, M. I. Lopez, R. B. Wicker, e J. Bracke, "Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 368, no. 1917, pp. 1999-2032, apr 2010. 18
- [53] M. Namiki, M. Ueda, A. Todoroki, Y. Hirano, e R. Matsuzaki, "3D Printing of continuous fiber reinforced plastic," in *SAMPE Seattle*, 2014. 18
- [54] AMRC Design and Prototyping Group, "FDM Printed Fixed Wing UAV," Tech. Rep., 2014. 19
- [55] R. C. Michelson e S. Reece, "Update on Flapping Wing Micro Air Vehicle Research Ongoing work to Develop a Flapping Wing, Crawling "Entomopter"," in *13th Bristol International RPV/UAV Systems Conference Proceedings*, vol. 30, 1998. 19
- [56] T. Zhang, I. Student, C. Zhou, S. Su, e I. Member, "Design and Development of Bio-Inspired Flapping Wing Aerial Vehicles," in *Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS), 2015 International Conference*, 2015. 19
- [57] S. K. Moon, Y. E. Tan, J. Hwang, e Y.-J. Yoon, "Application of 3D Printing Technology for Designing Light-weight Unmanned Aerial Vehicle Wing Structures," *International Journal Of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 223-228, 2014. 19
- [58] Y. En Tan e S. Ki Moon, "Inflatable Wing Design for Micro UAVs using Indirect 3D Printing," in *11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 2014. 19
- [59] S. J. Furst, G. Bunget, e S. Seelecke, "Design and fabrication of a bat-inspired flapping-flight platform using shape memory alloy muscles and joints," *Smart Materials and Structures*, vol. 22, pp. 14011-12, 2013. 19
- [60] C. Richter e H. Lipson, "Untethered Hovering Flapping Flight of a 3D-Printed Mechanical Insect," *Artificial Life*, vol. 17, pp. 73-86, 2011. 19
- [61] E. Kroll e D. Artzi, "Lessons from Wind Tunnel Modles Made By Rapid Prototyping," in *50th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences*, 2010. 19
- [62] N. A. Ahmed e J. R. Page, "Manufacture of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Advanced Project Design using 3D Printing technology," *Applied Mechanics and Materials*, pp. 970-980, 2013. 19

- [63] M. Ferraro, A. Lock, J. P. Scanlan, e A. J. Keane MFerraro, “Design and flight test of a civil unmanned aerial vehicle for maritime patrol: the use of 3D-printed structural components,” University of Southampton, Tech. Rep., 2014. 19
- [64] N. Lievendag, “3D Printing Filament Guide: ABS vs PLA vs many materials.” [Online]. Disponível: <http://nicklievendag.com/filament-guide/> (Acedido em: 2017-07-17). 23
- [65] J. Cantrell, S. Rohde, D. Damiani, R. Gurnani, L. Disandro, J. Anton, A. Young, A. Jerez, D. Steinbach, C. Kroese, e P. Ifju, “Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 811-824, 2017. 24
- [66] S. Farah, D. G. Anderson, e R. Langer, “Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review □,” *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 107, pp. 367-392, 2016. 24
- [67] D. P. Raymer, *Aircraft Design: A Conceptual Approach*. Washington D.C: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992. 25
- [68] G. Desena, “Pressure Distribution on an Airfoil,” United States Naval Academy, Annapolis, Maryland, Tech. Rep., 2012. 26
- [69] X.-p. Li, L.-y. Zhao, e Z.-z. Liu, “Topological Optimization of Continuum Structure based on ANSYS,” in *MATEC Web of Conferences*, H. Yuan, R. Agarwal, P. Tandon, e E. Wang, Eds., vol. 95, feb 2017. 51
- [70] “SpaceClaim.” [Online]. Disponível: <http://www.spaceclaim.com/en/Resources/webinars.aspx> (Acedido em: 2017-07-27). 53





## Apêndice A

### Imagens Ansys escala automática

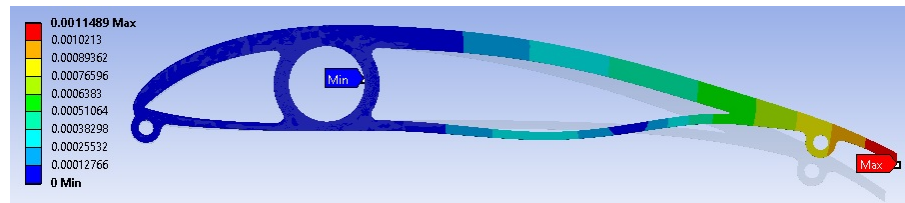


Figura A.1: Deformação total para a primeira topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

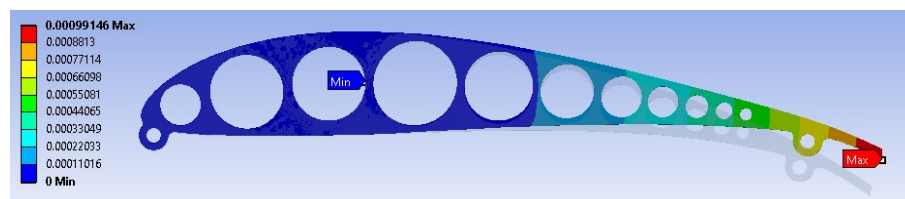


Figura A.2: Deformação total para a segunda topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

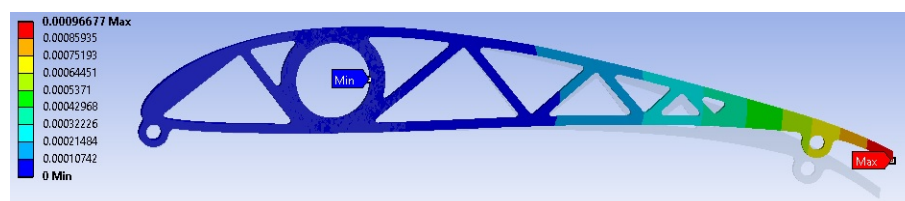


Figura A.3: Deformação total para a terceira topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

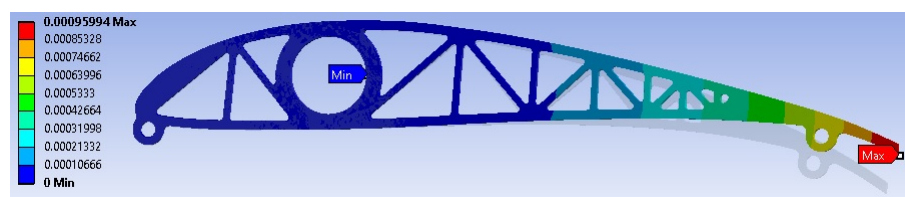


Figura A.4: Deformação total para a quarta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

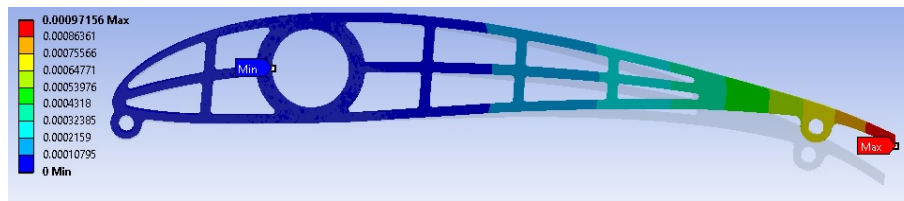


Figura A.5: Deformação total para a quinta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

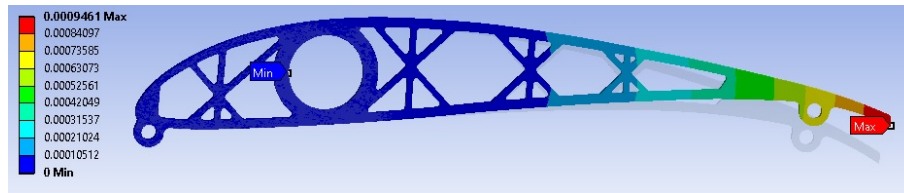


Figura A.6: Deformação total para a sexta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

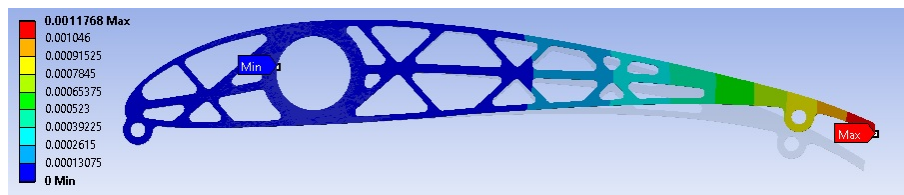


Figura A.7: Deformação total para a sétima topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

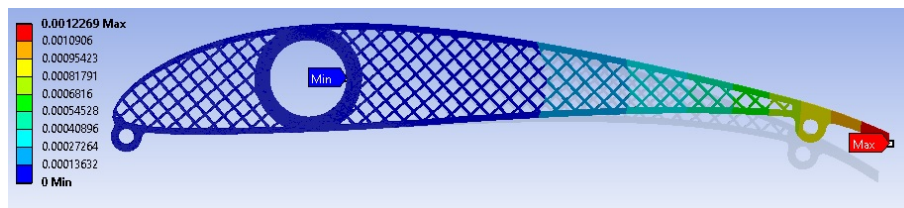


Figura A.8: Deformação total para a oitava topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

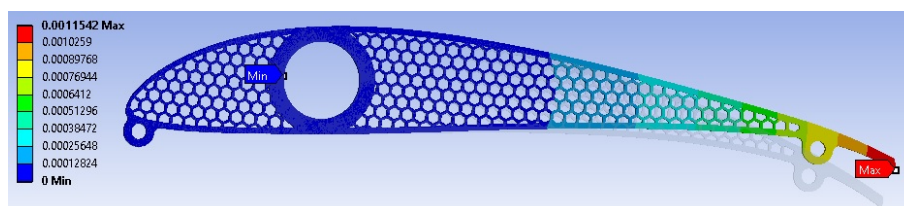


Figura A.9: Deformação total para a nona topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

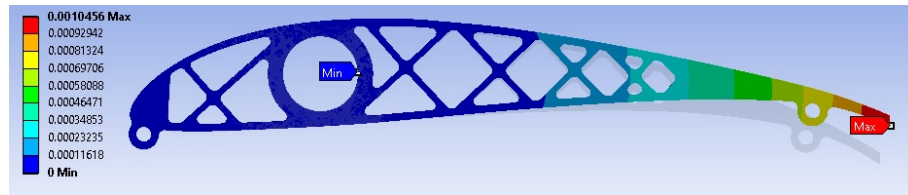


Figura A.10: Deformação total para a décima topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

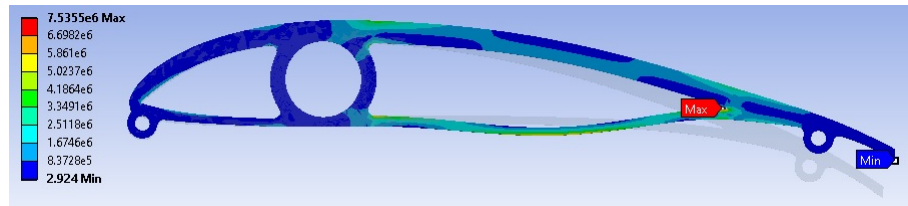


Figura A.11: Tensão equivalente de von-Mises para a primeira topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

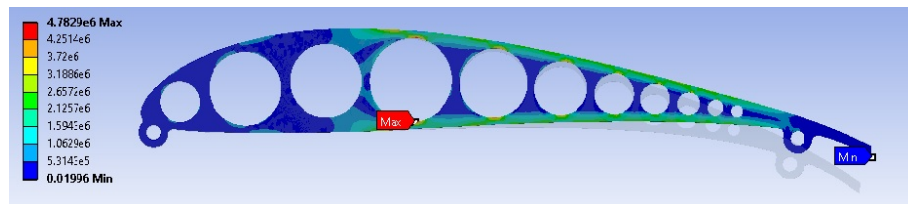


Figura A.12: Tensão equivalente de von-Mises para a segunda topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

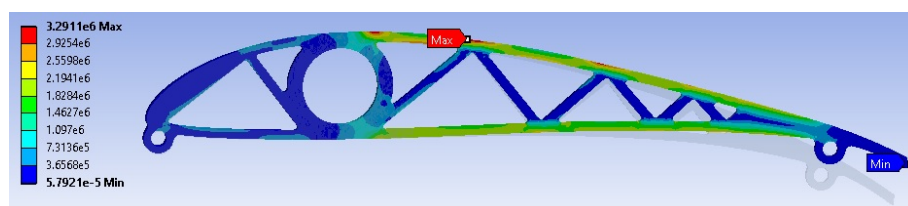


Figura A.13: Tensão equivalente de von-Mises para a terceira topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

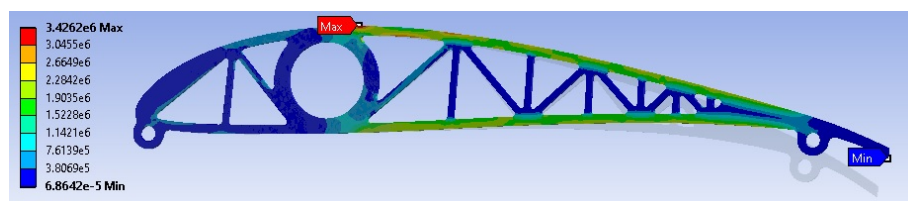


Figura A.14: Tensão equivalente de von-Mises para a quarta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

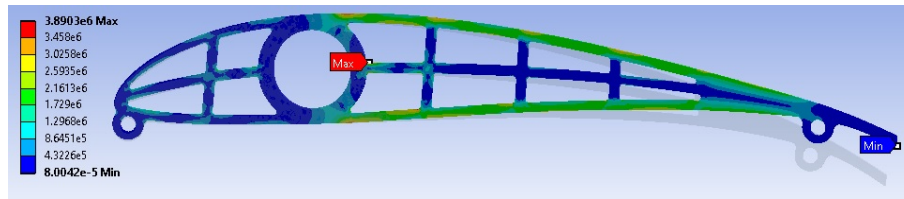


Figura A.15: Tensão equivalente de von-Mises para a quinta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

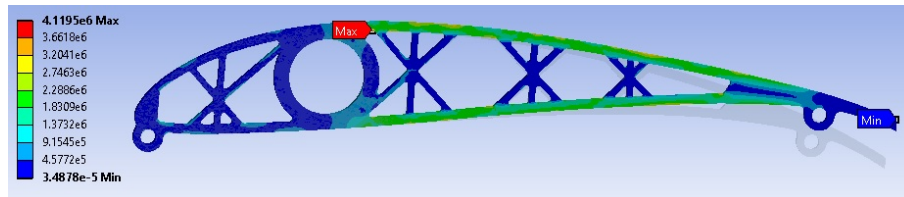


Figura A.16: Tensão equivalente de von-Mises para a sexta topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

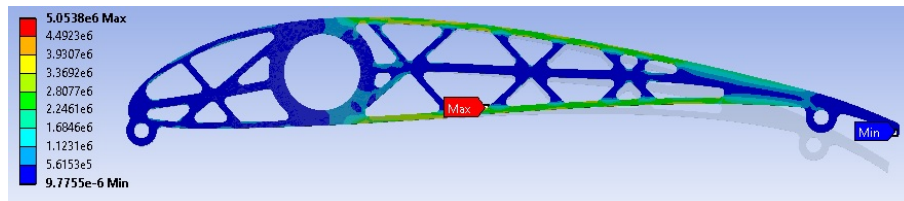


Figura A.17: Tensão equivalente de von-Mises para a sétima topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

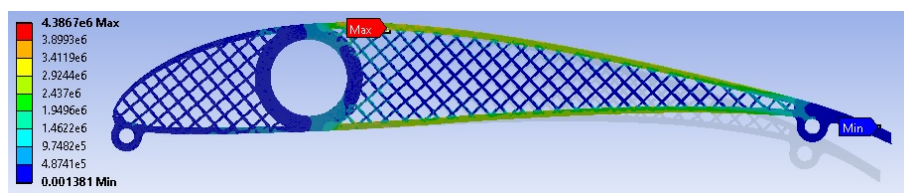


Figura A.18: Tensão equivalente de von-Mises para a oitava topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

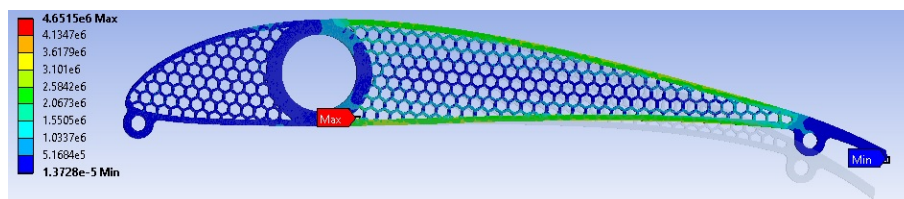


Figura A.19: Tensão equivalente de von-Mises para o nono modelo durante o primeiro carregamento (escala automática).

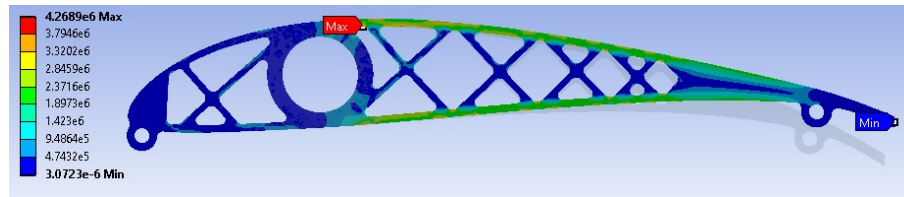


Figura A.20: Tensão equivalente de von-Mises para a décima topologia durante o primeiro carregamento (escala automática).

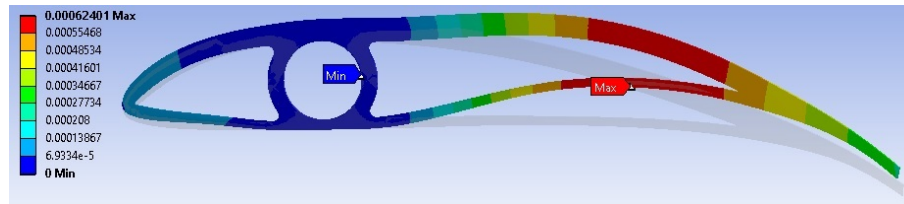


Figura A.21: Deformação total para a primeira topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

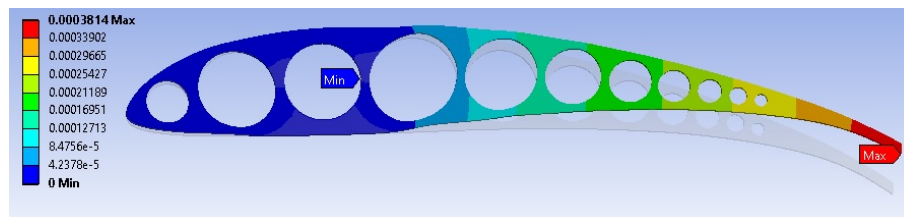


Figura A.22: Deformação total para a segunda topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

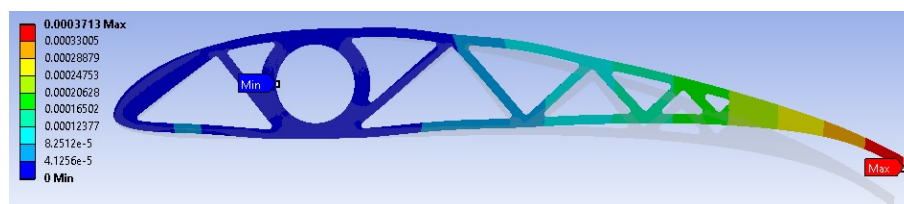


Figura A.23: Deformação total para a terceira topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

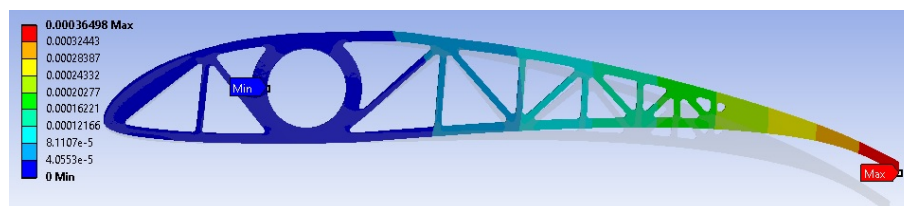


Figura A.24: Deformação total para a quarta topologia durante o segundo carregamento (escala automática).



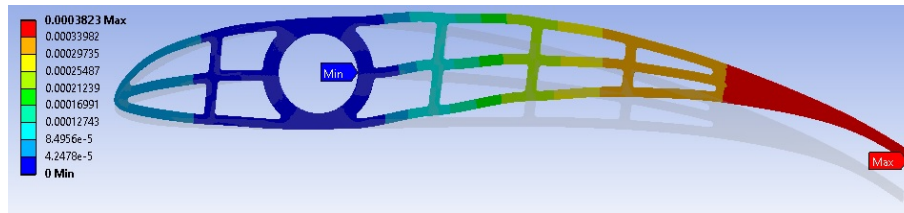


Figura A.25: Deformação total para a quinta topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

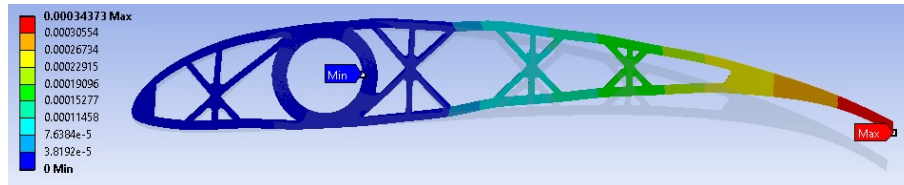


Figura A.26: Deformação total para a sexta topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

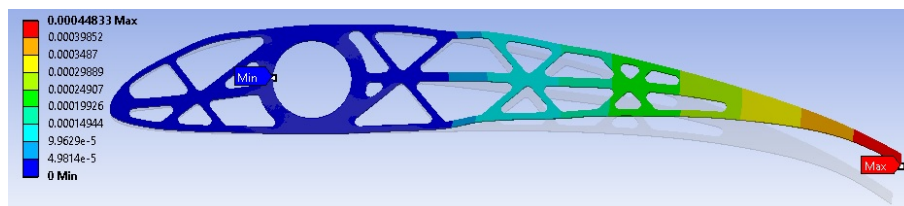


Figura A.27: Deformação total para a sétima topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

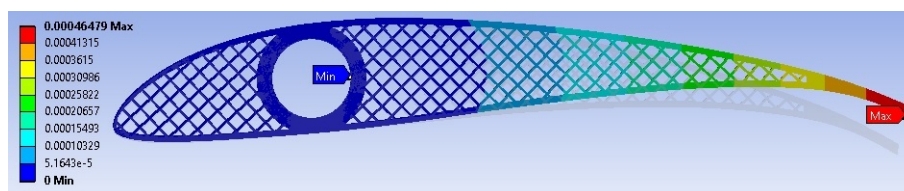


Figura A.28: Deformação total para a oitava topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

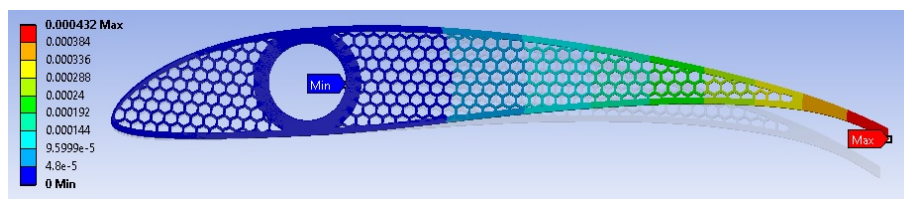


Figura A.29: Deformação total para a nona topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

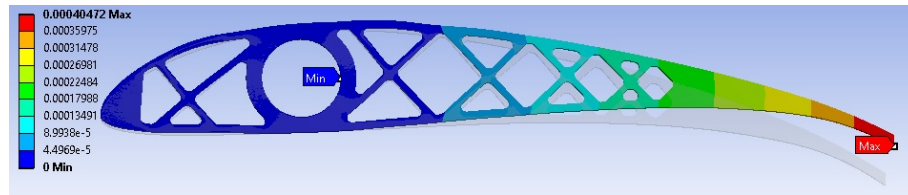


Figura A.30: Deformação total para a décima topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

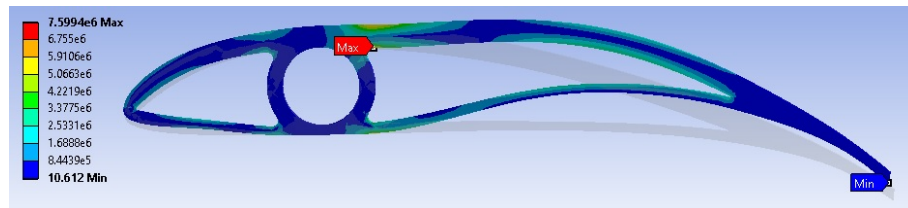


Figura A.31: Tensão equivalente de von-Mises para a primeira topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

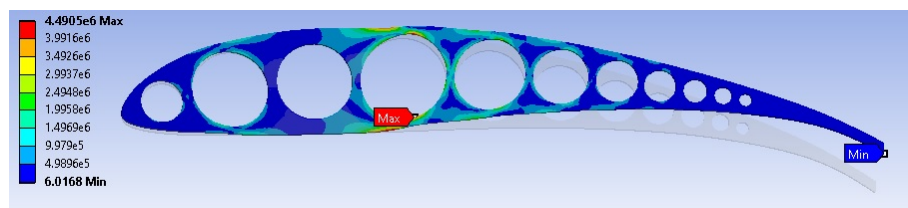


Figura A.32: Tensão equivalente de von-Mises para a segunda topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

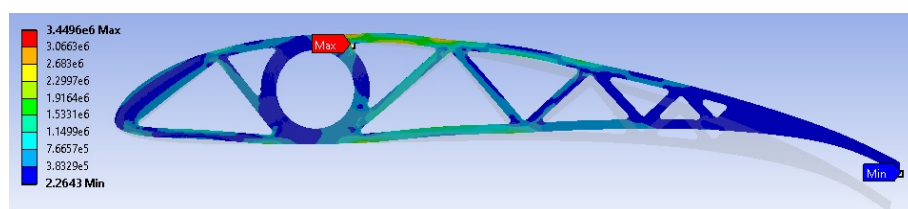


Figura A.33: Tensão equivalente de von-Mises para a terceira topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

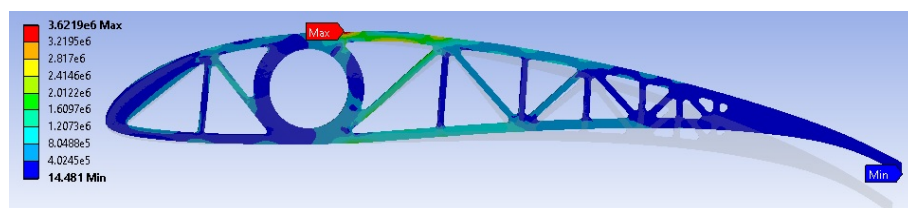


Figura A.34: Tensão equivalente de von-Mises para a quarta topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

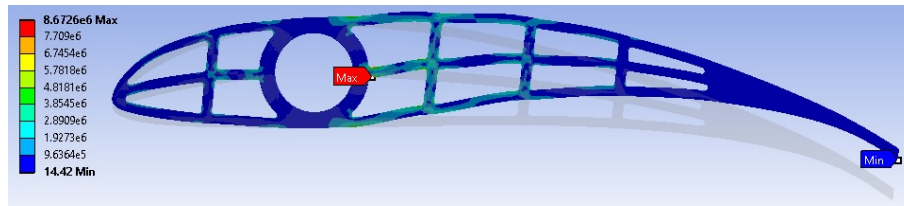


Figura A.35: Tensão equivalente de von-Mises para a quinta topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

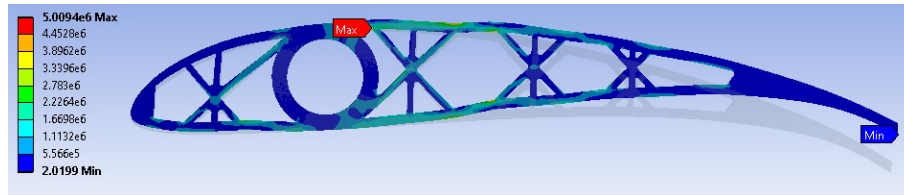


Figura A.36: Tensão equivalente de von-Mises para a sexta topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

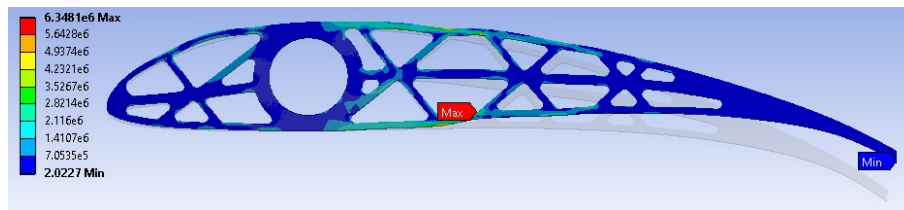


Figura A.37: Tensão equivalente de von-Mises para a sétima topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

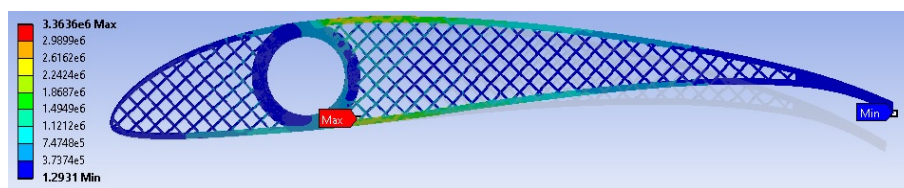


Figura A.38: Tensão equivalente de von-Mises para a oitava topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

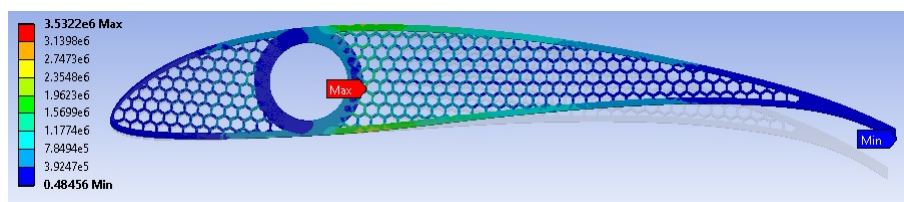


Figura A.39: Tensão equivalente de von-Mises para a nona topologia durante o segundo carregamento (escala automática).



## Investigação e otimização topológica de nervuras obtidas através de fabrico aditivo

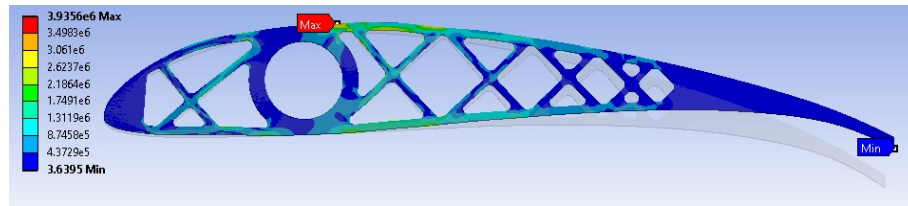


Figura A.40: Tensão equivalente de von-Mises para a décima topologia durante o segundo carregamento (escala automática).

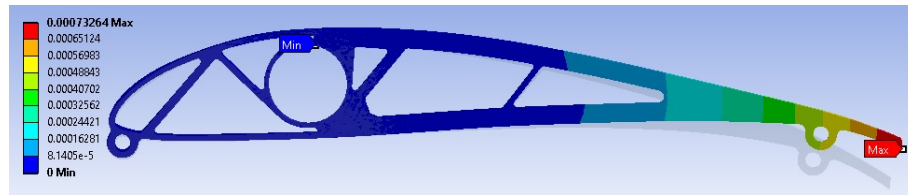


Figura A.41: Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da primeira otimização do primeiro conjunto de análises (escala automática).

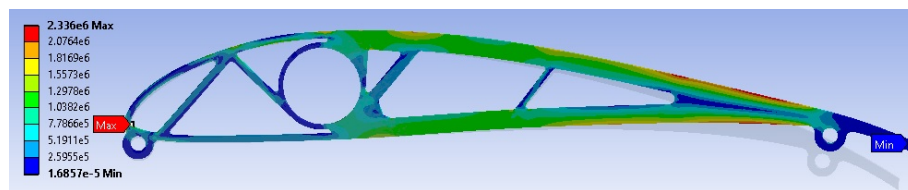


Figura A.42: Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da primeira otimização do primeiro conjunto de análises (escala automática).

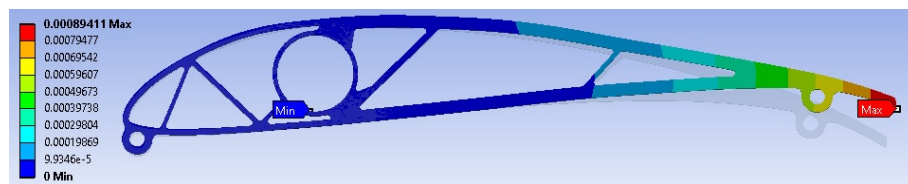


Figura A.43: Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da segunda otimização do primeiro conjunto de análises (escala automática).

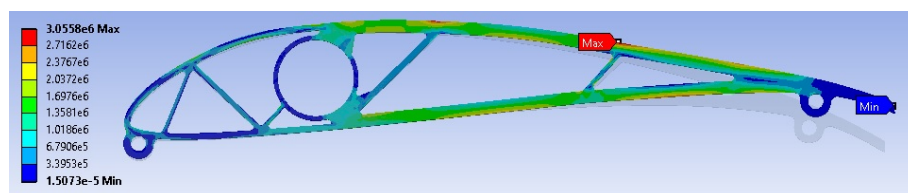


Figura A.44: Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da segunda otimização do primeiro conjunto de análises (escala automática).

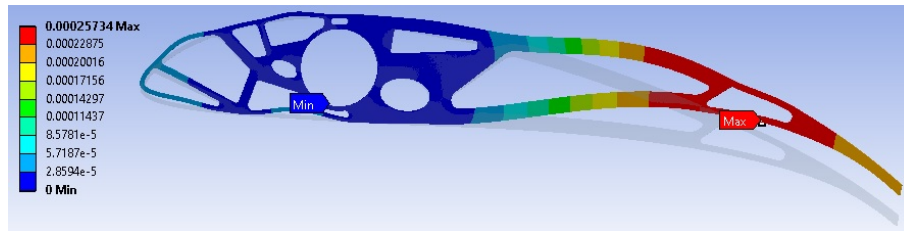


Figura A.45: Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da primeira otimização do segundo conjunto de análises (escala automática).

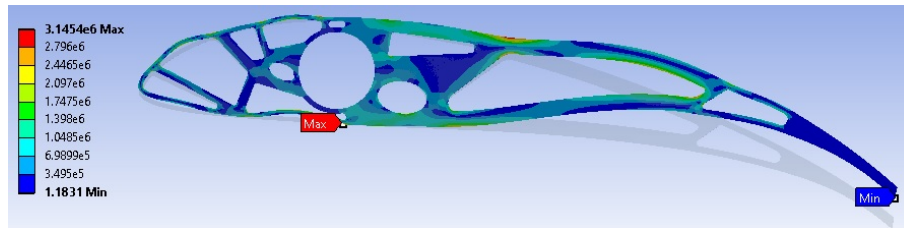


Figura A.46: Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da primeira otimização do segundo conjunto de análises (escala automática).

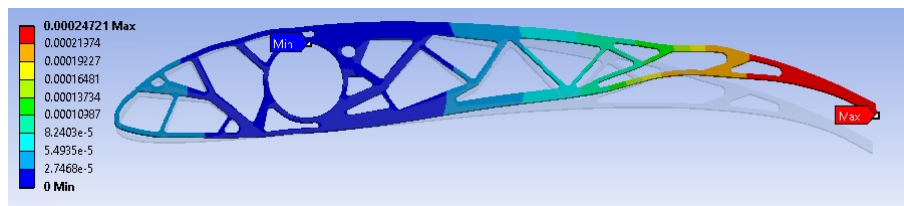


Figura A.47: Distribuição de deformação ao longo da nervura resultante da segunda otimização do segundo conjunto de análises (escala automática).

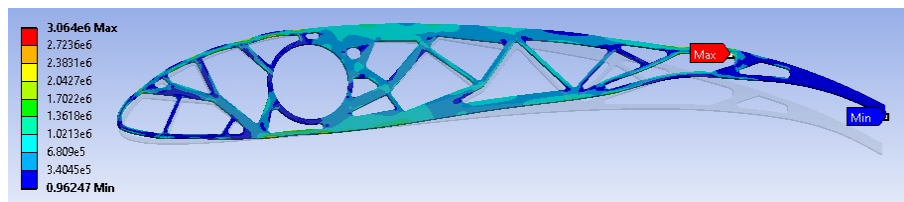


Figura A.48: Distribuição da tensão equivalente de von-Mises ao longo da nervura resultante da segunda otimização do segundo conjunto de análises (escala automática).